

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.

Jornal is indexed in Web of Science, Academic Resource Index Research Bib 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	С.А. Вижва, д-р геол. наук, проф. О.В. Шабатура, д-р геол. наук, доц. (заст. головн. ред.); О.І. Меньшов, д-р геол. наук, ст. дослідник (відп. секр.); В.Г. Бахмутов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; З.О. Вижва, д-р фіз.-мат. 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.; 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.; В.А. Михайлов, д-р геол. 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; К. Лі, Китайський геологічний університет, Китай; М. Олівія, Лісабонський університет, Португалія; П. Перейра, Університет Миколаса Ромеріса, Литва; В. Портнов, Карагандинський державний технічний університет, Казахстан; С. Спассов, Геофізичний центр Доурбес, Бельгія; В. Шмідт, Університет Мюнстера, Німеччина
Адреса редколегії	ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна ☎ (38044) 431 04 40; електронна адреса: geolvisnyk@ukr.net; http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua
Затверджено	Вченою радою ННІ "Інститут геології" 16 березня 2022 року (протокол № 11)
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	6-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601, Україна; ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 72; факс 239 31 28

UDC 504+550+551+552+624

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах даних Web of Science, 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**

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

Ukrainian Members:

O. Shabatura, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof. (Deputy Editor-in-Chief); O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher (Executive Secretary); V. Bakhmutov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher; Z. Vyzhva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; Prof.; O. Dubyna, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.; V. Zagnitko, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; V. Zacerkovniy, Dr. Sci. (Tech.), Prof.; O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Karpenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; I. Korchagin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; Prof.; V. Lozitsky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; B. Maslov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; V. Mykhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Mytrokhin, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; G. Milinevskiy, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; V. Nesterovskiy, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; V. Ogar, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; M. Orliuk, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Shevchenko, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher; V. Shevchuk, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; S. Shnyukov, Dr. Sci. (Geol.), 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; A. El Albani, Université de Poitiers, France; O. Ivakhnenko, Kazakh British Technical University, Kazakhstan; A. Koroneos, Aristotle University of Thessaloniki, Greece; Q. Liu, China University of Geosciences, China; M. Olivia, University of Lisbon, Portugal; P. Pereira, Mykolas Romeris University, Lithuania; V. Portnov, Karaganda State Technical University, Kazakhstan; V. Schmidt, Münster University, Germany; S. Spassov, Geophysical Center of Dourbes, Belgium; A. Vesnaver, Italian National Institute of Oceanography and Applied Geophysics, Italy; Q. Zeng, China University of Geosciences, China

Address

Institute of Geology, 90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine,
tel. (38044) 431 04 40; e-mail: geolvisnyk@ukr.net;
<http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua>

Approved by the

Academic Council of the Institute of Geology
March 16, 2022 (Minutes # 11)

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",
State Certificate # 1103 issued on 31.10.2002

Address

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

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

Мєнасова А., Попова Л., Дзевєрін І. Морфометрична характеристика представників роду <i>Tirasiana</i> з вендських відкладів Поділля.....	6
---	---

ГЕОФІЗИКА

Вижва С., Онищук В., Онищук І., Рева М., Шабатура О. Колекторські властивості глибокозанурених ущільнених порід карбону цунтрального грабена ДДЗ.....	11
Кєндзера О., Микуляк С., Семенова Ю., Скуратівська І., Скуратівський С. Резонансні властивості шаруватого ґрунтового масиву, що містить прошарок з коливними включеннями	20
Іванік О., Мєньшов О., Кравченко Д., Бєндар К., Гадяцька К., Тустановська Л., Хоменко Р. Методичні аспекти оцінки зсувної небезпеки в межах урбанізованих територій (на прикладі модельної ділянки Лиса гора, Київ).....	27
Ахмедов Т. Детальне вивчення швидкісного розрізу комплексуванням сейсмічних даних одноразового та багаторазового профілювання	34
Пирієв Р. Огляд електромагнітних моніторингових досліджень у прогнозі землетрусів: останні результати та нові перспективи.....	40
Насібова Г., Мухтарова Х., Нариманов Р.Н. Колекторські властивості та перспективність відкладів нижнього пліоцену площі Умід Бакинського архіпєлагу	46

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

Покалюк В., Коржнев М. Петрохімічна типізація метасєфо-псамітових асоціацій Українського щита та її значення для літогенетичних реконструкцій і міжрегіональних стратиграфічних корєляцій	53
Бабаєв Н. Гєохімічні особливості накопичення рідкісних і розсіяних елементів у сопкових брекчіях грязєвих вулканів Азербайджану (Абшеронський півострів, Гєбустан).....	59

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Михайлов В., Шнюков С., Кєструба А., Харитєнова Т., Григорєва Х., Ткалич М. Правові аспекти переробки залізних руд Криворізького залізорудного басєйну.....	64
---	----

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

Шпак О., Гаврилук Р., Лєгвинєнко О. Оцінка ефективності ремєдіації геологічного середовища на території складу паливно-мастильних матеріалів аєропорту "Бориспіль"	76
---	----

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

Хрущєв Д., Чумачєнко С., Зацерковний В., Трофимєнко П., Сплєдїтель А. Концептуальні засади інфєогеологічного моделювання територій військової діяльності	83
Зур'єн О., Барїло А. Порівняльний аналіз гїдротермальних теплонаєсних установок закритого та відкритого типу з різними джерєлами низькопотєнційної енергії	94
Попов М., Топольницький М., Титарєнко О., Станкєвич С. Метод формування прогнозних оцінок нафтогаєноєності ділянок надр шляхом комбїнування геологічної, наземної параметричної та супутникової інформації	104

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

Mienasova A., Popova L., Dzeverin I. Morphometrics of <i>Tirasiana</i> from vendian of Podillia (Ukraine).....	6
--	---

GEOFYSICS

Vyzhva S., Onyshchuk V., Onyshchuk I., Reva M., Shabatura O. Reservoir properties of deep-seated consolidated rocks of carboniferous period of the central graben of the Dnieper-Donetsk Depression.....	11
Kendzera O., Mykulyak S., Semenova Yu., Skurativska I., Skurativskiy S. Resonant properties of layered soil massif containing a layer with oscillating inclusions	20
Ivanik O., Menshov O., Kravchenko D., Bondar K., Hadiatska K., Tustanovska L., Khomenko R. Methodological aspects of landslide risk assessment within urban areas (case study of the model site Lysa Gora, Kyiv)	27
Ahmadov T. Detailed study of the velocity section by integrating seismic data of single and multiple profiling.....	34
Piriyev R. Review of electromagnetic monitoring studies in predicting earthquakes: recent results and new perspectives	40
Nasibova G., Mukhtarova Kh., Narimanov R. Reservoir properties and perspectives of lower pliocene sediments in the Umid area of the Baku Archipelago	46

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

Pokalyuk V., Korzhnev M. Petrochemical typization of metapsefites-metapsammites of the Ukrainian shield and its significance for lithogenetic reconstructions and inter-regional stratigraphic correlations	53
Babayev N. Geochemical characteristics of the accumulation of rare and scattered elements in the breccias of mud volcanoes of Azerbaijan (Absheron peninsula, Gobustan)	59

MINERAL RESOURCES

Mikhailov V., Shniukov S., Kostruba A., Kharytonova T., Hryhorieva K., Tkalych M. Legal aspects of iron ore processing in the Kryvyi Rih iron ore basin	64
---	----

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

Shpak O., Havryliuk R., Lohvynenko O. Efficiency assessment of remediation actions in the site of subsurface contamination with petroleum products within the fuel and lubricants warehouse of Boryspil airport	76
---	----

GEOLOGICAL INFORMATICS

Khrushchov D., Chumachenko S., Zatserkovnyi V., Trofymenko P., Splodytel A. Conceptual framework for infogeological modeling of military activity territories	83
Zurian O., Barilo A. Comparative analysis of hydrothermal heat pump installations of closed and open types with different sources of low-potential energy	94
Popov M., Topolnytskyi M., Titarenko O., Stankevich S. Method for oil and gas estimates of exploration sites via geological, parametric and satellite information	104

СОДЕРЖАНИЕ

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Менасова А., Попова Л., Дзевеин И. морфометрическая характеристика представителей рода <i>Tirasiana</i> из вендских отложений подолии.....	6
--	---

ГЕОФИЗИКА

Выжва С., Онищук В., Онищук И., Рева Н., Шабатура А. Коллекторские свойства глубокопогруженных уплотненных пород карбона центрального грабена ДДВ	11
Кендзера А., Микуляк С., Семенова Ю., Скуратовская И., Скуратовский С. Резонансные свойства слоистого грунтового массива, содержащего слой с осциллирующими включениями	20
Иваник Е., Меньшов А., Кравченко Д., Бондарь К., Гадяцкая Е., Тустановская Л., Хоменко Р. Методические аспекты оценки оползней в пределах урбанизированных территорий (на примере модельного участка Лысая гора, Киев)	27
Ахмедов Т. Детальное изучение скоростного разреза комплексированием сейсмических данных однократного и многократного профилирования	34
Пириев Р. Обзор электромагнитных мониторинговых исследований в прогнозе землетрясений: последние результаты и новые перспективы	40
Насибова Г., Мухтарова Х., Нариманов Р. Коллекторские свойства и перспективность отложений нижнего плиоцена площади Умид Бакинского архипелага	46

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Покалюк В., Коржнев М. Петрохимическая типизация метапсефо-псаммитовых ассоциаций Украинского щита и ее значение для литогенетических реконструкций и межрегиональных стратиграфических корреляций.....	53
Бабаев Н. Геохимические особенности накопления редких и рассеянных элементов в сопочных брекчиях грязевых вулканов Азербайджана (Абшеронский полуостров, Гобустан)	59

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Михайлов В., Шнюков С., Коструба А., Харитонов Т., Григорьев А., Kostruba, ва X., Ткалич М. Правовые аспекты переработки железных руд Криворожского железорудного бассейна	64
--	----

ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Шпак Е., Гаврилюк Р., Логвиненко О. Оценка эффективности ремедиации геологической среды на территории склада горюче-смазочных материалов аэропорта Борисполь	76
---	----

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

Хрущов Д., Чумаченко С., Зацерковный В., Трофименко П., Сплодитель А. Концептуальные положения инфогеологического моделирования территорий военной деятельности	83
Зурьян А., Барыло А. Сравнительный анализ гидротермальных теплонасосных установок закрытого и открытого типов с разными источниками низкопотенциальной энергии	94
Попов М., Топольницкий М., Титаренко О., Станкевич С. Метод формирования прогнозных оценок нефтегазоносности участков недр путем комбинирования геологической, наземной параметрической и спутниковой информации	104

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 551.56:57.07(519.2)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.01>

А. Мєнасова, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: mangelina@ukr.net,

ННІ "Інститут геології", Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;

Л. Попова, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: liliapopovalilia@gmail.com;

І. Дзевєрін, д-р біол. наук,

E-mail: igordzeverin@gmail.com;

Інститут зоології ім. І.І. Шмальгаузена НАН України,

вул. Б. Хмельницького, 15, м. Київ, 01030, Україна

МОРФОМЕТРИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДСТАВНИКІВ РОДУ *TIRASIANA* З ВЕНДСЬКИХ ВІДКЛАДІВ ПОДІЛЛЯ

(Представлено членами редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. З.О. Вижвою та д-ром геол. наук, проф. В.В. Огарем)
Tirasiana Palij, 1976 – рід радіально-симетричних вендобіонтів, що зберігаються у вигляді позитивного гіпорельєфу – двох накладених один на одний дисків. Тірасіани відомі з вендських відкладів Подільського Придністров'я, місцезнаходжень Білого моря і Уралу. Для кращого розуміння природи і способу життя представників вендської біоти, відбитки *Tirasiana* з Придністров'я було досліджено статистичними методами. Вибірка складалася з 29 екземплярів. Для перевірки припущення про алометричний характер росту тірасіан було використано дві ознаки: діаметри зовнішнього та внутрішнього дисків. У результаті дослідження було виявлено практично досконале ізометричне співвідношення діаметрів дисків тірасіан, що суперечить припущенню про спорідненість тірасіан з кишковопорожнинними.

Проаналізовано характери розподілів обох досліджених ознак і перевірено припущення про їхню нормальність. Побудовано гістограми розподілів та емпіричні додаткові кумулятивні функції розподілів. Якщо припустити неперервний ріст організмів протягом усього онтогенезу і пропорційність лінійного розміру та віку особи, кумулятивні функції можна розглядати як криві виживання особин у вибірці і аналізувати стандартними методами, прийнятими в екології. Якщо прийняти це припущення, то для тірасіан характерна крива виживання першого типу, яка відповідає зростанню імовірності загибелі особин з віком.

Формування тафоценозу відбувалося внаслідок поховання організмів теригенним матеріалом, що надходить у палеобасейн з незакріпленого рослинністю прилеглої суходолу. Гетерогенність вибірки імовірно пояснюється наявністю "стацій переживання" – частин акваторії, захищених від впливу каламутних потоків певними елементами рельєфу морського дна або узбережжя (виступи скель, пересипи тощо). Саме в таких захищених місцях тірасіани могли досягати значно більших розмірів.

Ключові слова: тірасіани, вендська біота, метазоа, ізометричний і алометричний ріст, Подільське Придністров'є, криві виживання.

Вступ, аналіз попередніх досліджень і публікацій.

На сьогодні безперечно встановленим фактом є те, що біота вендського (едіакарського) періоду принципово відрізняється від усіх (і древніших, і фанерозойських) відомих біот. Тому, незважаючи на більш ніж півсторіччя досліджень, до ясного розуміння природи цих організмів ще дуже далеко. У багатьох випадках наявні дані залишають значне поле для дискусій, оскільки не завжди можна впевнено стверджувати навіть, чи є ці організми багатоклітинними еукаріотами або колоніями найпростіших (Antcliffe et al., 2011); тваринами чи рослинами. А в результаті ретельних багаторічних досліджень погляди на ту чи іншу групу іноді взагалі кардинально змінюються, як це було, наприклад з *Kimberella* (Fedonkin and Waggoner, 1997). Особливо це стосується седентарних форм, для яких невідомі сліди повзання чи харчування (Ivantsov et al., 2014; Leonov, 2007; Seilacher, 1992).

Перші дослідники (Wade, 1968; Glaessner, 1984) розглядали всі вендські організми як предкові форми сучасних Cnidaria, Annelida і Arthropoda і розміщували їх у складі відповідних таксонів. Так, досі радіально-симетричні форми часто по інерції називають "медузоїдами", хоча жодних вагомих доказів того, що це представники саме типу Cnidaria, не існувало, а філогенез цих організмів із самого початку викликав цілу низку запитань. І до сьогодні, час від часу в друці з'являються повідомлення про численні знахідки начебто предкових форм різноманітних сучасних груп, зокрема лопотрохозой (Martyshyn and Churpyna, 2019).

У декількох наймасовіших видів вендобіонтів було досліджено індивідуальну мінливість, унаслідок чого з'ясувалося, що за перебігом онтогенетичних процесів вендобіонти досить різноманітні. У різних представників групи виявлено як ізометричний, так і алометричний ріст, появу де ново метамерних структур тощо (Liu and Dunn, 2020). Враховуючи значення алометричних чи ізометричних співвідношень між ознаками для розуміння фізіології та онтогенезу організмів, доречно було б продовжити вивчення таких співвідношень на ще не дослідженому в цьому плані матеріалі. Це може бути цікавим і виходячи з тієї обставини, що деякі радіально-симетричні відбитки виявилися прикріплювальними дисками ще однієї загадкової групи вендобіонтів – Petalonamae.

Розглянута в цій роботі *Tirasiana Palij*, 1976, має ту перевагу, що у неї легко взяти водночас два розмірні показники – можливість, недоступна для такого роду як, наприклад, *Nemiana Palij*, 1976.

Зліпки (позитивний гіпорельєф) виду *Tirasiana disciformis* були описані з верхньої частини бернашівських верств яришівської світи верхнього венду Середнього Придністров'я (Палий, 1976) і являють собою два диски, накладені один на одний. Верхній диск меншого діаметру і часто більш опуклий, в його центрі – невеличкий круглий бугорок, який часто має свіжий скол, що свідчить про його продовження в породу, що підстеляє. Кількість зон залишається незмінною, що може свідчити про імовірну спеціалізацію частин тіла і, відповідно, вищий ступінь організації, ніж у більшості радіально-симетричних

вендських організмів, яких нерідко зближують з кишково-порожнинними (Гуреев, 1987; Fedonkin, 1992).

Мета роботи, матеріал та методи дослідження. Метою роботи була спроба з допомогою методів статистичного аналізу з'ясувати природу і спосіб життя представників роду *Tirasiana*, відбитки яких, крім Подільського Придністров'я, зустрічаються також у місцезнаходженнях вендських відкладів Зимового берегу Білого моря і Уралу. Нами використана вибірка з 29 особин, зібраних і описаних В.М. Палієм. Вибірка знаходиться в колекції ННІ "Інститут геології" Київського національного університету: 2 екземпляри *Tirasiana coniformis*; 25 *T. disciformis*, зокрема 2 екземпляри, позначені в колекції як *T. coniformis*, однак перевизначені одним із авторів

(А.Ш. Менасова) як *T. disciformis*; 2 особи *Tirasiana*, видову належність яких встановити не вдалося.

Для перевірки припущення про алометричний характер росту тірасіан було досліджено дві ознаки: діаметри зовнішнього та внутрішнього дисків. Проаналізовано характери розподілу обох ознак, перевірено припущення про нормальність їхніх розподілів, побудовано гістограми розподілів (рис. 1а, б) та емпіричні додаткові кумулятивні функції розподілів (рис. 2а, б, в, г). Якщо припустити, що для *Tirasiana* був властивий тривалий неперервний ріст, і лінійні розміри цих істот були приблизно пропорційні їхньому віку, то дві останні функції можна розглядати як криві виживання особин у локальній групі *Tirasiana* та аналізувати їх стандартними методами, прийнятими в екології (Odum, 1975).

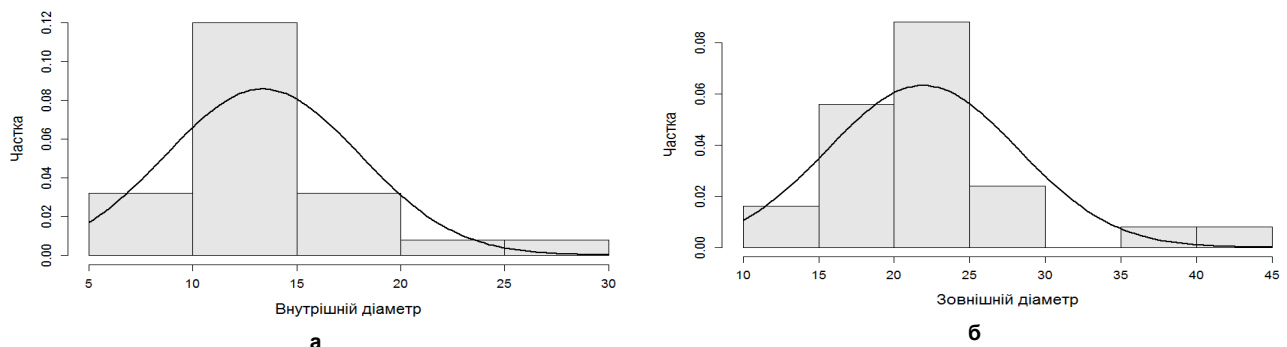


Рис. 1. Гістограми нормального розподілу значень внутрішніх (а) і зовнішніх (б) дисків

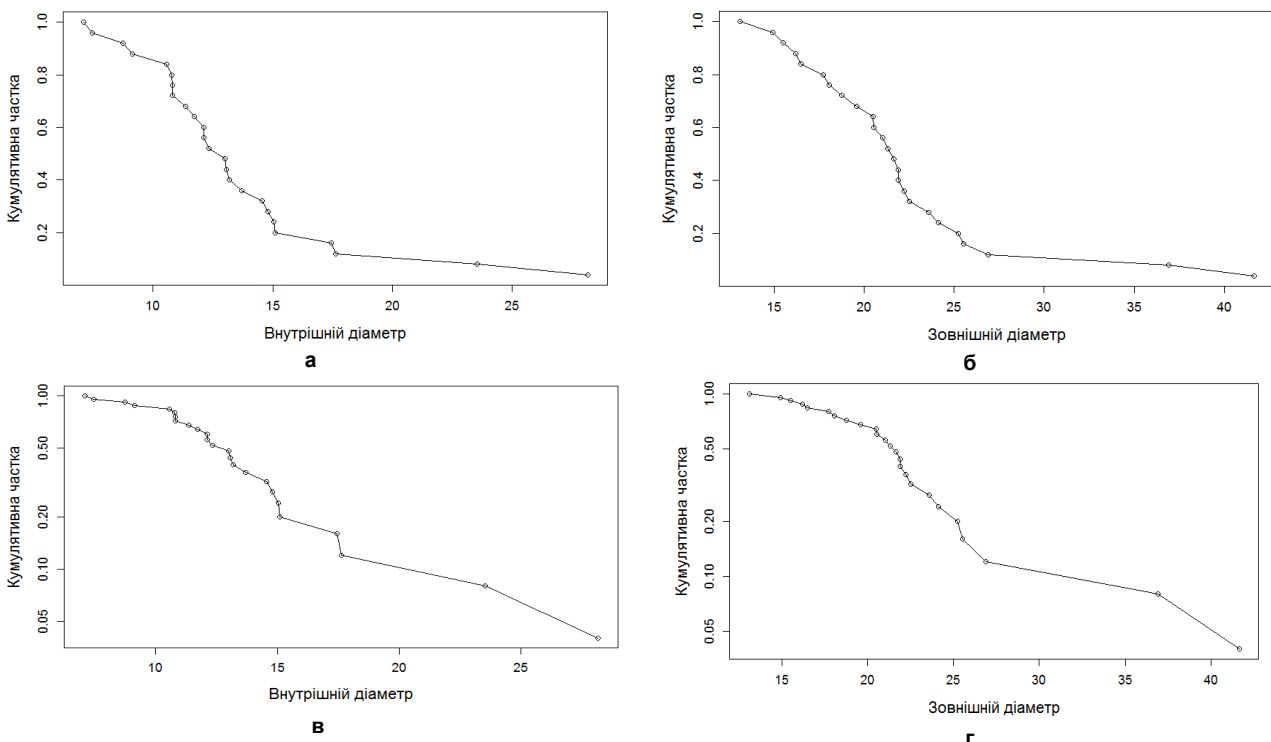


Рис. 2. Додаткові кумулятивні функції розподілу значень внутрішніх (а, в) і зовнішніх (б, г) дисків; шкала кумулятивних часток – лінійна (а, б), логарифмічна (в, г)

Для з'ясування характеру залежності між двома ознаками (рис. 3) було побудовано модель лінійної регресії внутрішнього діаметра на зовнішній за лог-трансформованими значеннями. За ізометрії коефіцієнт регресії у такій моделі має дорівнювати 1, за позитивної (негативної) алометрії – бути вірогідно більше (менше) 1.

Дослідження статистичних розподілів та кривих виживання обох ознак проведено для особин *T. disciformis*, а регресійний статистичний аналіз – для всієї сукупності тірасіан без поділу на види. Розрахунки було проведено за допомогою програми R v.3.6.3 (R CoreTeam, 2020). Окрім стандартних статистичних пакетів було застосовано пакет gvlma v.1.0.0.3 (Pena and Slate, 2019).

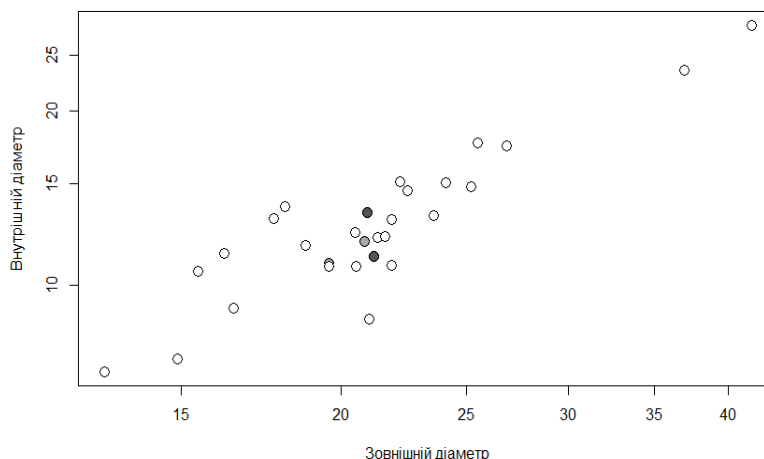


Рис. 3. Співвідношення внутрішніх і зовнішніх діаметрів видів роду *Tirasiana*.
Кружечки білого кольору – *T. disciformis*; світло-сірого – невідомої видової приналежності;
темно-сірого – *T. coniformis*.
Шкала логарифмічна

Результати. Відхилення від нормального розподілу щонайшвидше є наслідком гетерогенності вибірки: дві особини значно крупніші, ніж решта. Про гетерогенність вибірки свідчать і додаткові кумулятивні функції: на графіках ми бачимо, що поодинокі найкрупніші особини не відповідають тій залежності між кумулятивною часткою та розміром, яка властива переважній більшості особин (рис. 2а, б). Ця залежність близька до лінійної. Якщо не брати до уваги аномально крупні екземпляри, графік залежності між розміром та кумулятивною часткою в лінійній шкалі близький до прямої лінії (рис. 2а, б), і є трохи опуклою лінією в логарифмічній шкалі. А якщо інтерпретувати кумулятивну частку на рис. 2 як шанси на виживання особин, а розмір – як оцінку віку (див. вище), то можна припускати, що ймовірність загинути в особин *T. disciformis* зростала з віком, це відповідає I типу кривих виживання (Одум, 1975, рис. 76).

Співвідношення між двома ознаками у вибірці показано на рис. 3. Було побудовано модель лінійної регресії внутрішнього діаметра на зовнішній за логотрансформованими значеннями. Оскільки особини *T. coniformis* та особини невідомої видової належності принципово не відрізняються від *T. disciformis* за розташуванням на схемі, ми припустили, що цим організмам був властивий однаковий характер залежності між двома ознаками, і використали для регресійного аналізу усю вибірку, без поділу на види. Перевірка за допомогою програми gvlma показала, що застосування цієї моделі до наявних даних цілком коректне ($p = 0.73$). Модель є статистично значущою ($F[1, 27] = 107.2$, $p < 0.0001$), обидві ознаки досить тісно пов'язані між собою ($R^2 = 0.80$). Коефіцієнт регресії в рівнянні регресії дорівнює 1.09, його стандартна похибка дорівнює 0.11. Отже, наявні дані відповідають припущенню про ізометричне співвідношення між двома ознаками.

Обговорення і висновки. Виявлена мінливість за розмірами зовнішнього та внутрішнього діаметрів може свідчити про високий рівень екологічної пластичності або, якщо припускати, що розмір тіла в *T. disciformis* відображав вік, що досліджена вибірка являє собою стабільну популяцію, у якій різні вікові групи представлені порівняно рівномірно, не було дефіциту молодих особин, на зміну старим особинам підросли молоді. Якщо крива виживання II типу (Одум, 1975) відповідає однаковій ймовірності загибелі незалежно від віку організму, то в тірасіан ми

бачимо швидше лінійну залежність між віком та розмірами (якщо не брати до уваги аномально крупні особини; рис. 2). Отже, ймовірність загинути зростає з віком, що відповідає кривій виживання I типу (Одум, 1975).

Для седентарних безскелетних організмів, якими були тірасіани, така ситуація повністю відповідає теоретичним очікуванням. Формування тафоценозу відбувалося внаслідок поховання організмів теригенним матеріалом, що надходив у палеобасейн з незакріпленого рослинністю прилеглого суходолу. Сама текстура шаруватих пісковиків, що включали рештки, свідчить про те, що такі події були для цього палеобасейну звичайними – можливо, це наслідки каламутних потоків, спричинених дощами в умовах достатньо гумідного клімату (Мєнасова, 2019). Вибірку, сформовану таким чином, ми прийняли як таку, що еквівалентна осередненим результатам багаторічних спостережень за популяцією.

Гетерогенність дослідженої вибірки (наявність декількох особин, значно крупніших за решту (рис. 1-3)) можна пояснити наявністю "стацій переживання" (частин акваторії, захищених від впливу каламутних потоків певними елементами рельєфу морського дна або узбережжя (виступи скель, пересипи тощо). У таких захищених місцях тірасіани могли досягати значно більших розмірів.

Здатність *Tirasiana* підтримувати ізометричне співвідношення між розмірами зовнішнього та внутрішнього діаметрів свідчить про досить високий рівень регуляції морфогенезу – можливо, порівнянний з таким у багатоклітинних організмів та високоінтегрованих колоній. Водночас ми не бачимо якихось специфічних рис схожості *Tirasiana* з конкретними представниками цих груп.

Зближення *Tirasiana* з кишковопорожнинними (Sokolov and Iwanowski, 1990; Fedonkin, 1992) ґрунтується на певній подібності зовнішнього та внутрішнього дисків вендобіонта із зовнішнім та внутрішнім шарами клітин кишковопорожнинних. Однак у результаті нашого дослідження замість очікуваного алометричного співвідношення між загальним діаметром тіла і діаметром гастральної порожнини було виявлено наявність у тірасіан практично досконалого ізометричного співвідношення діаметрів зовнішнього і внутрішнього дисків. Отже, одностороннього підтвердження спорідненості тірасіан з кишковопорожнинними одержати не вдалося. Втім, і про належність *Tirasiana* до інших організмів з нескінченною кількістю осей симетрії, наприклад, ціанобактерій

(Ivantsov et al., 2014), губок (Reitner, Wörheide, 2002; Leonov, 2007) чи інших груп біоти, ізометричний ріст також не свідчить, з тієї очевидної причини, що окремі пари ознак, пов'язані лінійними співвідношеннями, можна знайти практично у будь-якого організму, зокрема і в найбільш просунутих представників Metazoa. Такі ж співвідношення є цілком звичайними в різних групах вендської біоти (Liu and Dunn, 2020). На сьогодні за результатами досліджень деякі радіально-симетричні відбитки ряду вендобіонтів виявилися прикріплювальними дисками петалоном (La Flamme et al., 2004; Серёжнікова, 2005), тобто чимось на кшталт ризоїдів, тому, можливо, ці організми були більш схожими з рослинами, ніж вважалося раніше.

Вважаємо, що подальше використання морфометричних методів є доволі перспективним у плані досліджень особливостей будови, природи, систематики та екологічних умов існування едіакарської біоти.

Список використаних джерел

- Гуреев, Ю.А. (1987). Морфологический анализ и систематика вендиат. К.: ИГН АН УССР.
- Менасова, А.Ш. (2019). Найдавніші водорості Подолії як каталізатор процесів фосфоритоутворення. *Мінеральні ресурси України*, 1, 21-25.
- Одум, Ю. (1975). Основы экологии. Москва: Мир.
- Палий, В.М. (1976). Остатки бесскелетной фауны и следы жизнедеятельности из отложений верхнего докембрия и нижнего кембрия Подолії. В кн.: Палеонтология и стратиграфия верхнего докембрия и нижнего палеозоя юго-запада Восточно-Европейской платформы, 63–77. К.: Наукова думка.
- Серёжнікова, Е.А. (2005). Новая интерпретация ископаемых отпечатков *Hemalora* из вендских отложений Оленекского поднятия (Северо-восток Сибирской платформы). *Бюлл. МОИП. Отд. Геол.*, 80(3), 26–32.
- Antcliffe, J.B. et al. (2011). Testing the Protozoan hypothesis for Ediacaran fossils: a developmental analysis of Palaeopascichnus. *Palaeontology*, 54(5), 1157–1175. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2011.01058.x>
- Fedonkin, M.A. (1992). Vendian faunas and the early evolution of Metazoa. In: J.H. Lipps and P.W. Signor (Eds.) *Origin and the Early Evolution of Metazoa*, 87–129. New York: Plenum Press.
- Fedonkin, M. A., Waggoner, B. M. (1997). The late Precambrian fossil *Kimberella* is a mollusc-like bilaterian organism. *Nature*, 388, 868–871.
- Glaessner, M.F. (1984). The dawn of animal life. A biohistorical study. Cambridge: Univ. press.
- Ivantsov, A.Yu., Gritsenko, V.P., Konstantinenko, L.I., Zakrevskaya, V.A. (2014). Revision of the Problematic Vendian Macrofossil *Beltanelliformis* (=Beltanelloides, Nemiana). *Paleontological Journal*, 48, 13, 1423–1448.
- La Flamme, M., Narbonne, G. M., Anderson, M. M. (2004). Morphometric Analysis of the Ediacaran frond *Charniodiscus* from the Mistaken Point formation, Newfoundland. *Paleontological Journal*, 78(5), 827–837.
- Leonov, M.V. (2007). Comparative taphonomy of Vendian genera Beltanelloides and Nemiana: taxonomy and lifestyle. *Geological Society*, 286 (1), 259–267. London: Special Publications.
- Liu, A.G., Dunn, F.S. (2020). Filamentous Connections between Ediacaran Fronds. *Current Biology*, 30, 7, 1322–1328. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.01.052>.
- Martyshyn, A.I., Chupryna, A.M. (2019). Precambrian ancestors of Lophotrochozoa in the Ediacaran deposits of Podillia. *Paleontological investigation of Don-Dniper downwarp. Materials of International scientific conference and XXXIX session of the Paleontological Society NAS of Ukraine*, 13–14. Kyiv: PS NASU.
- Mienasova, A.Sh. (2019). The ancient Podolia's algae as trigger for the formation of phosphorites. *Mineral Resources of Ukraine*, 1, 21–25.
- Mienasova, A.Sh., Popova, L.V., Dzeverin, I.I., Tustanovska, L.V. (2019). Isometry of body size parameters in Tirasiana Pali, 1976 from the upper Vendian of the Podolian Dniester area. *Abstracts of XVIIIth International conference Geoinformatics: "Teoretical and Applied Aspects", EAGE*, 13–16 May, Kyiv, Ukraine.
- Odum, E.P. (1983). Basic ecology. W.B. Saunders Company.
- Pena, E., Slate, E. (2019). gvlma: Global validation of linear models assumptions. R-package version 1.0.0.3. <https://CRAN.R-project.org/package=gvlma>.
- Reitner, J., Wörheide, G. (2002). Non-Lithistid fossil Demospongiae – Origins of their palaeobiodiversity and highlights in history of preservation. In: Systema Porifera: A Guide to the Classification of Sponges, J.N. Hooper, J.N. Van Soest (Eds.), 52–68. N.-Y.: Kluweracad. Plenum publ.
- Seilacher, A. (1992). Vendobionta and Psammocorallia: lost construction of Precambrian evolution. *J. Geol., Soc. London*, 150, 607–613.
- Serezhnikova, E.A. (2005). New interpretation of fossil imprints in the Vendian deposits of Olenek uplift (Northeast of Siberian Platform). *Bull. MOIP. Geol. Dep.*, 80(3), 26–32. [in Russian]
- Sokolov, B.S., Iwanowski, A.B. (Eds.). (1990). Vendian System. Paleontology. Vol. 1. Berlin: Springer-Verlag.
- Wade, M. (1968). Preservation of soft-bodied animals in Precambrian sandstones at Ediacara, South-Australia. *Lethaia*, 1, 3, 238–267.

Systema Porifera: A Guide to the Classification of Sponges, J.N. Hooper, J.N. Van Soest (Eds.), 52–68. N.-Y.: Kluweracad. Plenum publ.

R CoreTeam (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.R-project.org/>.

Seilacher, A. (1992). Vendobionta and Psammocorallia: lost construction of Precambrian evolution. *J. Geol., Soc. London*, 150, 607–613.

Sokolov, B.S., Iwanowski, A.B. (Eds.). (1990). Vendian System. Paleontology. Vol. 1. Berlin: Springer-Verlag.

Wade, M. (1968). Preservation of soft-bodied animals in Precambrian sandstones at Ediacara, South-Australia. *Lethaia*, 1, 3, 238–267.

References

- Antcliffe, J.B. et al. (2011). Testing the Protozoan hypothesis for Ediacaran fossils: a developmental analysis of Palaeopascichnus. *Palaeontology*, 54(5), 1157–1175. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2011.01058.x>
- Fedonkin, M. A., Waggoner, B. M. (1997). The late Precambrian fossil *Kimberella* is a mollusc-like bilaterian organism. *Nature*, 388, 868–871.
- Fedonkin, M.A. (1992). Vendian faunas and the early evolution of Metazoa. In: J.H. Lipps and P.W. Signor (Eds.) *Origin and the Early Evolution of Metazoa*, 87–129. New York: Plenum Press.
- Glaessner, M.F. (1984). The dawn of animal life. A biohistorical study. Cambridge: Univ. press.
- Gureev, Yu.A. (1987). Morphological Analysis and Taxonomy Vendiat. Kyiv: Inst. Geol. Nauk Akad. Nauk SSSR [in Russian]
- Ivantsov, A.Yu., Gritsenko, V.P., Konstantinenko, L.I., Zakrevskaya, V.A. (2014). Revision of the Problematic Vendian Macrofossil *Beltanelliformis* (=Beltanelloides, Nemiana). *Paleontological Journal*, 48, 13, 1423–1448.
- La Flamme, M., Narbonne, G. M., Anderson, M. M. (2004). Morphometric Analysis of the Ediacaran frond *Charniodiscus* from the Mistaken Point formation, Newfoundland. *Paleontological Journal*, 78(5), 827–837.
- Leonov, M.V. (2007). Comparative taphonomy of Vendian genera Beltanelloides and Nemiana: taxonomy and lifestyle. *Geological Society*, 286 (1), 259–267. London: Special Publications.
- Liu, A.G., Dunn, F.S. (2020). Filamentous Connections between Ediacaran Fronds. *Current Biology*, 30, 7, 1322–1328. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.01.052>.
- Martyshyn, A.I., Chupryna, A.M. (2019). Precambrian ancestors of Lophotrochozoa in the Ediacaran deposits of Podillia. *Paleontological investigation of Don-Dniper downwarp. Materials of International scientific conference and XXXIX session of the Paleontological Society NAS of Ukraine*, 13–14. Kyiv: PS NASU.
- Mienasova, A.Sh. (2019). The ancient Podolia's algae as trigger for the formation of phosphorites. *Mineral Resources of Ukraine*, 1, 21–25.
- Mienasova, A.Sh., Popova, L.V., Dzeverin, I.I., Tustanovska, L.V. (2019). Isometry of body size parameters in Tirasiana Pali, 1976 from the upper Vendian of the Podolian Dniester area. *Abstracts of XVIIIth International conference Geoinformatics: "Teoretical and Applied Aspects", EAGE*, 13–16 May, Kyiv, Ukraine.
- Odum, E. (1975). Fundamentals of ecology. Moscow: Mir. [in Russian]
- Odum, E.P. (1983). Basic ecology. W.B. Saunders Company.
- Paliy V. M. (1976). Remains of soft-bodied fauna and ichnofossils from Upper Precambrian and Lower Cambrian deposits. In: *Paleontology and Stratigraphy of Upper Precambrian and Lower Paleozoic of the East European platform*, 63–77. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Pena, E., Slate, E. (2019). gvlma: Global validation of linear models assumptions. R-package version 1.0.0.3. <https://CRAN.R-project.org/package=gvlma>.
- R CoreTeam (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.R-project.org/>.
- Reitner, J., Wörheide, G. (2002). Non-Lithistid fossil Demospongiae – Origins of their palaeobiodiversity and highlights in history of preservation. In: Systema Porifera: A Guide to the Classification of Sponges, J.N. Hooper, J.N. Van Soest (Eds.), 52–68. N.-Y.: Kluweracad. Plenum publ.
- Seilacher, A. (1992). Vendobionta and Psammocorallia: lost construction of Precambrian evolution. *J. Geol., Soc. London*, 150, 607–613.
- Serezhnikova, E.A. (2005). New interpretation of fossil imprints in the Vendian deposits of Olenek uplift (Northeast of Siberian Platform). *Bull. MOIP. Geol. Dep.*, 80(3), 26–32. [in Russian]
- Sokolov, B.S., Iwanowski, A.B. (Eds.). (1990). Vendian System. Paleontology. Vol. 1. Berlin: Springer-Verlag.
- Wade, M. (1968). Preservation of soft-bodied animals in Precambrian sandstones at Ediacara, South-Australia. *Lethaia*, 1, 3, 238–267.

Надійшла до редколегії 14.06.21

A. Mienasova, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,
 E-mail: mangelina@ukr.net,
 Taras Schevchenko National University of Kyiv,
 Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
 L. Popova, Cand. Sci. (Geol.), Senior Researcher,
 E-mail: liliapopovalilia@gmail.com;
 I. Dzeverin, Dr. Sci. (Biol.),
 E-mail: igordzeverin@gmail.com;
 Schmalhausen Institute of Zoology NAS of Ukraine,
 15 B. Khmelnytskyi Str., Kyiv, 01030, Ukraine

MORPHOMETRICS OF *TIRASIANA* FROM VENDIAN OF PODILLIA (UKRAINE)

Tirasiana Palij, 1976 is a genus of radially symmetric Vendobionts, which were preserved as a positive hyporelief of two superimposed discs. *Tirasiana* are found in the Vendian deposits of the Podolian Dnister area, the White Sea area and the Urals. For better understanding of the nature and lifestyle of Vendian biota, imprints of the *Tirasiana* were investigated by statistical methods. Sampling of 29 specimens of *Tirasiana* was studied. To test the hypothesis about the allometric growth of *Tirasiana*, two features were studied, the diameters of the outer and inner discs. As a result of the study, it has been established that the relationship between internal and external diameters of the imprints is almost ideally isometric, which means that there is no evidence for relation between *Tirasiana* and Cnidaria.

The distribution patterns of these features were analyzed and the assumption about their normality was tested. Histograms of their distribution and empirical additional cumulative distribution functions were constructed. Based on the assumption of the constant growth of *Tirasiana* throughout ontogenesis and the proportionality of the linear size and individual age, the cumulative distribution functions may be considered as survival curves in the sampling of specimens of *Tirasiana* and may be analyzed by standard methods accepted in ecology. If we accept this assumption, then the survival curve of the first type is characteristic of the *Tirasiana*, which corresponds to the increase of probability of their death with the increase of individual age.

The studied taphocenosis was formed as a result of accumulation of terrigenous material, which came from the nearby land that was not stabilized by vegetation. This terrigenous sediment buried benthic sublittoral communities regularly. The heterogeneity of the sampling of specimens can be explained by the presence of "survival stations", well-protected parts of the palaeobasin (overhanging rocks, baybar, etc.). As a result, in such places *Tirasiana* could attain much larger size.

Keywords: *Tirasiana*, Vendian biota, metazoa, Podolian Dnister area, isometric and allometric growth, survival curves.

А. Менасова, канд. геол. наук, доц.,
 E-mail: mangelina@ukr.net,
 Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
 УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
 Л. Попова, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
 E-mail: liliapopovalilia@gmail.com;
 И. Дзеверин, д-р биол. наук,
 E-mail: igordzeverin@gmail.com;
 Институт зоологии им. И.И. Шмальгаузена НАН Украины,
 ул. Б. Хмельницкого, 15, г. Киев, 01030, Україна

МОРФОМЕТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *TIRASIANA* ИЗ ВЕНДСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОДОЛИИ

Tirasiana Palij, 1976 – род радиально-симметричных вендобиионтов, которые сохраняются в позитивном гипорельефе в виде наложенных друг на друга дисков. Тирасианы известны из вендских отложений Подольского Приднестровья, местонахождений Белого моря и Урала. Для лучшего понимания природы и образа жизни представителей вендской биоты отпечатки *Tirasiana* из Приднестровья были исследованы статистическими методами. Выборка состояла из 29 экземпляров. Для проверки предположения об аллометрическом характере роста тирасиан было использовано два признака: диаметры внешнего и внутреннего дисков. В результате исследования было выявлено практически совершенное изометрическое соотношение диаметров дисков тирасиан, что противоречит предположению о родстве тирасиан и кишечнополостных.

Был проанализирован характер распределения обоих признаков и проверено предположение про их нормальность. Построены гистограммы их распределения и эмпирические дополнительные кумулятивные функции распределений. Если предположить непрерывный рост организмов на протяжении всего онтогенеза и пропорциональность линейного размера и возраста особи, кумулятивные функции можно рассматривать как кривые выживания особей в выборке и анализировать стандартными методами, принятыми в экологии. Если принять это предположение, то для тирасиан характерна кривая выживания первого типа, которая отвечает большей вероятности гибели особей с возрастом.

Формирование тафоценоза происходило вследствие погребения организмов терригенным материалом, который поступал в палеобассейн с прилегающей суши, незакрепленной растительностью.

Гетерогенность выборки возможно объясняется наличием "станций переживания" (частей акватории, защищенных от воздействия мутьевых потоков некоторыми элементами рельефа морского дна или побережья, например выступами скал, пересыпью и т.п.). Именно в таких защищенных местах тирасианы могли бы достигать значительно больших размеров.

Ключевые слова: тирасианы, вендская биота, метазоа, изометричный и аллометричный рост, Подольское Приднестровье, кривые выживания.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.02>

С. Вижва, д-р. геол. наук, проф.,

E-mail: s.vyzhva@knu.ua;

В. Онищук, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua;

І. Онищук, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

Email: oivan1@ukr.net;

М. Рева, канд. фіз.-мат. наук, доц.,

E-mail: mvreva@gmail.com;

О. Шабатура, канд. геол. наук,

E-mail: dard@ukr.net;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна**КОЛЕКТОРСЬКІ ВЛАСТИВОСТІ ГЛИБОКОЗАНУРЕНИХ УЩІЛЬНЕНИХ ПОРІД КАРБОНУ
ЦЕНТРАЛЬНОГО ГРАБЕНА ДДЗ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)*

Присвячено висвітленню результатів дослідження фільтраційно-ємнісних властивостей глибокозанираних ущільнених порід карбону (алевролітів, низькопористих пісковиків) центрального грабена Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ). Мета досліджень полягала у вивченні петрофізичних параметрів ущільнених порід-колекторів як основи комплексного аналізу їх фізичних властивостей. Дослідженню підлягали такі фільтраційно-ємнісні характеристики зразків порід, як коефіцієнт відкритої та ефективної пористості, коефіцієнт проникності та коефіцієнт залишкового водонасичення. Наведено межі змін та середні значення фільтраційно-ємнісних параметрів досліджених порід, а також класифікація їх колекторських властивостей. На основі капілярметричних досліджень виконано оцінку структури пористого простору порід.

Проведений кореляційний аналіз дозволив отримати ряд емпіричних залежностей між фільтраційно-ємнісними параметрами досліджених порід – густиною, коефіцієнтом пористості, коефіцієнтом ефективної пористості та коефіцієнтом залишкового водонасичення, а також встановити кореляційні залежності між коефіцієнтами пористості, вимірними в атмосферних та пластових умовах. Ці залежності можуть бути використані під час інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин та моделюванні фільтраційно-ємнісних параметрів ущільнених порід-колекторів центрального грабена ДДЗ.

Ключові слова: пісковики; алевроліти; фільтраційно-ємнісні параметри; густина; коефіцієнти пористості, проникності, залишкового водонасичення; кореляційні залежності.

Постановка проблеми. Особливе місце серед нетрадиційних джерел видобутку нафти та газу посідають поклади вуглеводнів в ущільнених колекторах. Такі колектори сформовані низькопористими, слабопроникними гірськими породами (Михайлов та ін., 2014а,б, 2015). За результатами виконаних останнім часом досліджень встановлено, що центральний грабен ДДЗ є одним із найперспективніших районів на наявність нетрадиційних покладів вуглеводнів (газ ущільнених порід, сланцевий газ тощо), які можуть у разі перевищувати ресурси традиційного типу (Михайлов та ін., 2014б, 2018).

Ущільнені породи складають покривки над колекторами, що містять вуглеводні. Окрім того, ущільнені утворення в низці регіонів містять значну кількість органіки і можуть слугувати як материнськими породами, так і колекторами газу. Розвиток новітніх технологій видобутку газу, основою яких є гідророзрив пласта, змінили ставлення до цих відкладів. Встановлено, що з багатих органікою ущільнених порід можна добувати газ у великих обсягах і з економічно прийнятною за нинішніх умов собівартістю.

Поклади вуглеводнів в ущільнених колекторах за цілою низкою ознак відрізняються від традиційних родовищ нафти та газу. Як правило, ущільнені колектори мають регіональне поширення. Найбільші скупчення газу характерні для центральних найбільш занурених частин нафтогазових басейнів. Тому такі скупчення вуглеводнів іменують "газ центральнобасейнового типу".

На сучасному етапі в різних країнах (у першу чергу у США і Канаді) проводяться інтенсивні роботи, спрямовані на створення ефективної технології виділення і оцінки газонасичених ущільнених порід та на підвищення продуктивності свердловин. Буріння горизонтальних

свердловин, орієнтованих у напрямку, перпендикулярному мінімальній горизонтальній напрузі порід, і проведення гідророзриву пласта в продуктивному інтервалі геологічного розрізу складає основу цієї технології. При цьому важливими є геофізичні та петрофізичні дослідження, а також математичне моделювання, на основі яких визначаються напрямки горизонтального стовбура свердловини і параметри гідророзриву.

У статті висвітлено фільтраційно-ємнісні параметри ущільнених порід, представлених низькопористими пісковиками і алевролітами. Характеристика петрофізичних властивостей цих порід є одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ ущільнених колекторів, що зумовлює актуальність їх петрофізичного вивчення.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Вивченню фізичних параметрів порід нафтогазоперспективних районів України присвячена низка публікацій (Вижва та ін., 2012–2014, 2016–2021; Vyzhva et al., 2017, 2019; Карпенко та ін., 2014, 2015; Маслов та ін., 2017; Михайлов та ін., 2014а,б, 2015, 2018; Нестеренко, 2010; Орлюк та ін., 2011, 2018; Orlyuk et al., 2018; Рибалка та Карпенко, 2016; Соболев та Карпенко, 2021; Старостенко та Русаков, 2015; Федоришин, 2018 та ін.) та багатьох інших авторів. Петрофізичні параметри порід мають важливе значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними свердловинних електрометричних та акустичних досліджень, тому їх вивченню приділяється значна увага. Слід відзначити, що петрофізичні параметри порід і кореляційні залежності між ними мають досить виражений індивідуальний характер стосовно кожної

ділянки досліджень. Тому лабораторне визначення цих властивостей та встановлення відповідних кореляційних зв'язків між ними для кожної перспективної площі потребують виконання як окремих досліджень, так і окремого публічного висвітлення їх результатів.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Зважаючи на ситуацію з енергоносіями у світі, на сучасному етапі проблема пошуків та вивчення нетрадиційних джерел вуглеводнів на території України є надзвичайно актуальною. З метою оцінки перспективності геологічних структур та комплексів на вуглеводні вивчення петрофізичних властивостей гірських порід має важливе значення. Петрофізичні параметри порід необхідні при інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень свердловин, а також при оцінці параметрів гідророзриву пласта.

Незважаючи на велику кількість публікацій, для ущільнених порід-колекторів практично відсутні дані їх лабораторних фільтраційно-ємнісних досліджень та кореляційних залежностей між фільтраційно-ємнісними параметрами. Слід відзначити, що петрофізичні дослідження до недавнього часу були спрямовані переважно на вивчення порід-колекторів традиційних джерел вуглеводнів, і на сьогодні петрофізичні параметри ущільнених порід слабко вивчені або не вивчені.

Мета досліджень – оцінка петрофізичних параметрів глибокозанурених ущільнених порід-колекторів карбону перспективних ділянок центрального грабену Дніпровсько-Донецької западини як основи комплексного аналізу їх фізичних властивостей.

Слід відзначити, що кореляційні зв'язки між ємнісно-фільтраційними параметрами і даними свердловинних та польових геофізичних методів є досить складними і потребують ретельного вивчення. Основою для визначення цих зв'язків є комплекс лабораторних петрофізичних досліджень. Матеріали, отримані в результаті лабораторних досліджень про зміни густини порід, їх питомого електричного опору, швидкості поширення пружних хвиль у них та їх кореляційні зв'язки із фільтраційно-ємнісними параметрами використовуються для інтерпретації результатів електрометричних і акустичних методів досліджень свердловин, польової електро-розвідки і сейсморозвідки.

Експериментальні петрофізичні дослідження. У НДЛ теоретичної і прикладної геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка виконано комплекс петрофізичних досліджень, що включав визначення: густини порід; відкритої та ефективної пористості; структури капілярного простору; питомого електричного опору; швидкості пружних хвиль в атмосферних і пластових умовах. Усі лабораторні дослідження виконувались відповідно до чинних нормативних документів.

У цій статті наведено результати комплексних досліджень петрофізичних властивостей колекції із 115 зразків ущільнених порід – пісковиків (96 зразків) і алевролітів (19 зразків) центрального грабену ДДЗ, площі: Західношебелинська (інтервал глибин 4929-5491 м); Коломацька (інтервал глибин 5290-5650 м);

Веселівська (інтервал глибин 3618-3761 м). Досліджені породи представлені пісковиками дрібнозернистими та середньозернистими сірими та світло-сірими, а також алевролітами слюдистими темно-сірими до чорних.

Методика петрофізичних досліджень. З метою визначення об'ємної густини досліджених порід у сухому стані виконувалось зважування та вимірювання геометричних розмірів спеціальних лабораторних зразків циліндричної форми, а в насиченому стані – застосовувався метод гідростатичного зважування за стандартною методикою попередньо насичених зразків (*Тиаб и Доналдсон, 2009; Инструкция ..., 1977; Дортман, 1992а, б*). Для визначення ваги зразків використовувались цифрові аналітичні ваги WPS 360/c/2 (точність $\pm 0,001$ г).

Коефіцієнт відкритої пористості визначався методом гідростатичного зважування та газоволюметричним способом згідно із стандартною методикою. Зразки гірських порід насичувалися моделлю пластової води – розчином NaCl з мінералізацією 196 г/л і зважувалися цифровими аналітичними вагами WPS 360/c/2. Середня відносна похибка визначень коефіцієнта пористості склала 1,1 %.

Капілярметричні дослідження виконувалися шляхом центрифугування зразків порід за допомогою центрифуги ОС-6М (*Породы..., 1985; Рудько, 2005*). Обертова швидкість ротора центрифуги змінювалась від 1000 до 6000 об/хв із кроком 1000 об/хв, при цьому тиск витіснення змінювався від 0,03 до 1 МПа.

Для встановлення кореляційних зв'язків між ємнісними, електричними та акустичними параметрами порід в атмосферних і пластових умовах виконано комплекс петрофізичних досліджень із фізичним моделюванням пластових умов (температура $t=138-158^{\circ}\text{C}$; ефективний тиск $p_{\text{эф}}=60-70$ МПа; мінералізація $M=196$ г/л).

Аналіз даних лабораторних досліджень. У статті висвітлено результати виконаних комплексних лабораторних досліджень, визначено петрофізичні параметри ущільнених порід центрального грабену ДДЗ. Відомості про межі змін та середні значення петрофізичних параметрів порід, залежних від їх літології, наведено у відповідних таблицях.

Густина. За результатами лабораторних визначень густини встановлено, що цей параметр для сухих порід змінюється: для алевролітів від 2535 кг/м^3 (алевроліт темно-сірий) до 2698 кг/м^3 (алевроліт сірий) за середнього значення 2652 кг/м^3 , а для пісковиків – від 2397 кг/м^3 (пісковик дрібнозернистий, світло-сірий) до 2663 кг/м^3 (пісковик середньозернистий, сірий), за середнього значення 2530 кг/м^3 . Густина порід, насичених моделлю пластової води, варіює у межах: для алевролітів – від 2537 кг/м^3 до 2705 кг/м^3 за середнього значення 2673 кг/м^3 ; для пісковиків – від 2500 кг/м^3 до 2680 кг/м^3 за середнього значення 2589 кг/м^3 . Уявна мінералогічна густина алевролітів змінюється від 2586 до 2730 кг/м^3 за середнього значення 2699 кг/м^3 , а пісковиків – від 2587 кг/м^3 до 2754 кг/м^3 за середнього значення 2670 кг/м^3 . Широкі межі зміни густини свідчать про мінливість як літологічного складу досліджених порід, так і власне їхньої пористості (табл. 1).

Таблиця 1

Межі змін і середні значення густинних параметрів порід

Порода	Значення параметра	Густина (сухі), кг/м^3	Густина (насич. NaCl), кг/м^3	Уявна густина мінералогічна, кг/м^3
Алевроліти	мін.	2535	2537	2586
	макс.	2698	2705	2730
	сер.	2652	2673	2699
Пісковики	мін.	2397	2500	2587
	макс.	2663	2680	2754
	сер.	2530	2589	2670

Пористість. Властивість породи вміщувати флюїди (нафту, газ і воду) називається пористістю. Пористість породи – важливий параметр, який визначає ємність колектора. Розрізняють загальну, відкриту та ефективну пористість (Тиаб і Доналдсон, 2009; Інструкція ..., 1977; Дортман, 1992а, б). Пустотний простір породи характеризується коефіцієнтом пористості, а здатність породи пропускати через себе флюїди – коефіцієнтом проникності. Ці параметри породи для кожного типу флюїду визначають його об'єм, швидкість руху і технологію видобутку. Окрім того, важливими властивостями порід-колекторів є структура їх пустотного простору та вміст залишкової води (залежно від капілярного тиску), а також звивистість порових каналів. Структура осадових порід значною мірою визначається формою й окатаністю зерен, їх розмірами,

сортуванням, орієнтуванням і типом упаковки, а також хімічним складом (Тиаб і Доналдсон, 2009; Інструкція ..., 1977; Дортман, 1992а, б). Вивчення цих параметрів дозволяє отримати інформацію про катагенетичні і діагенетичні процеси та про механізми, які діяли під час транспортування й відкладення осадового матеріалу, ущільнення й деформації осадків (Тиаб і Доналдсон, 2009). За структурою породи можна візуально на якісному рівні оцінити ступінь її пористості й проникності. Зміни проникності можна прогнозувати, виходячи із змін розміру й форми частинок, а також розподілу пустотних каналів у породі.

Ущільнені породи загалом характеризуються зниженими значеннями пористості, у т. ч. і досліджені в цій статті. Відомості про межі змін та середні значення коефіцієнта пористості порід, залежно від їх виду, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Межі змін і середні значення ємнісних параметрів порід

Порода	Значення параметра	Коефіцієнт відкритої пористості, k_p		Коефіцієнт ефективної пористості, k_p	Коефіцієнт пористості в пласт. ум., $k_{p,пл}$
		насич. азотом	насич. NaCl		
Алевроліти	мін.	0,012	0,008	0,001	0,007
	макс.	0,070	0,048	0,011	0,035
	сер.	0,023	0,018	0,005	0,014
Пісковики	мін.	0,027	0,014	0,001	0,007
	макс.	0,117	0,095	0,072	0,084
	сер.	0,070	0,053	0,021	0,045

Коефіцієнт відкритої пористості порід, визначений газоволюметричним способом (насичення азотом), змінюється: для алевролітів від 0,012 (алевроліт слюди́стий) до 0,07 (алевроліт темно-сірий) за його середнього значення 0,023, а для пісковиків – від 0,027 (пісковик дрібнозерни́стий, сірий) до 0,117 (пісковик середньозерни́стий, світло-сірий) за його середнього значення 0,07. Коефіцієнт відкритої пористості порід, визначений насиченням моделлю пластової води (розчином NaCl), змінюється: для алевролітів від 0,008 до 0,048 за його середнього значення 0,018, а для пісковиків – від 0,014 до 0,095 за його середнього значення 0,053.

Згідно з існуючою класифікацією колекторів (Дахнов, 1975) за коефіцієнтом відкритої пористості досліджені породи належать до IV–V класів колекторів (пористість від низької до дуже низької) за винятком окремих зразків із середньою пористістю (III клас), що викликало їх тріщинуватість.

У результаті аналізу лабораторних даних встановлені кореляційні залежності між коефіцієнтами

пористості досліджених порід, визначеними газоволюметричним способом і методом насичення розчином NaCl, що описуються лінійними функціями:

$k_{p,NaCl} = 0,7084 \cdot k_{p,гв} + 0,0019$, при $R^2 = 0,93$ – алевроліти;

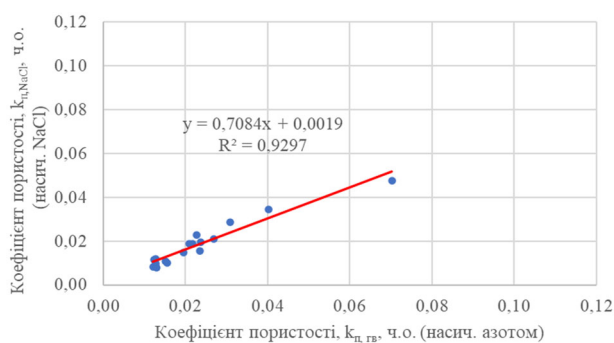
$k_{p,NaCl} = 0,8923 \cdot k_{p,гв} - 0,0091$, при $R^2 = 0,965$ – пісковики, де $k_{p,гв}$, $k_{p,NaCl}$ – коефіцієнти відкритої пористості, визначені, відповідно, газоволюметричним способом та насиченням моделлю пластової води (розчином NaCl). Графіки цих залежностей наведено на рис. 1а, б.

Окрім того, аналіз отриманих даних дозволив встановити кореляційні залежності між густиною досліджених порід (σ) та їх коефіцієнтом пористості ($k_{p,NaCl}$). Ці залежності також описуються лінійними функціями:

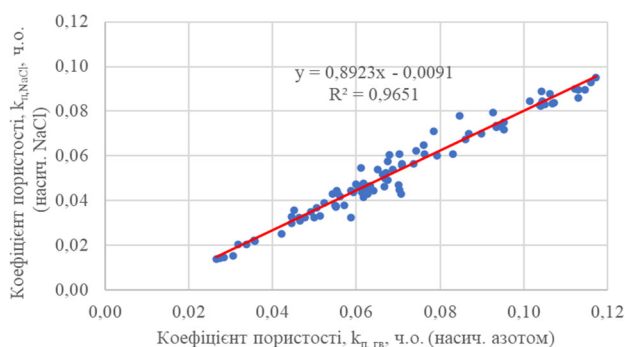
$k_{p,NaCl} = -0,0002 \cdot \sigma + 0,5727$, при $R^2 = 0,74$ – алевроліти;

$k_{p,NaCl} = -0,0004 \cdot \sigma + 1,035$, при $R^2 = 0,75$ – пісковики.

Графіки отриманих кореляційних залежностей наведено на рис. 2а, б.



а



б

Рис.1. Залежність між коефіцієнтами відкритої пористості, визначеними газоволюметричним способом ($k_{p,гв}$) і методом насичення розчином NaCl ($k_{p,NaCl}$): а – алевроліти, б – пісковики

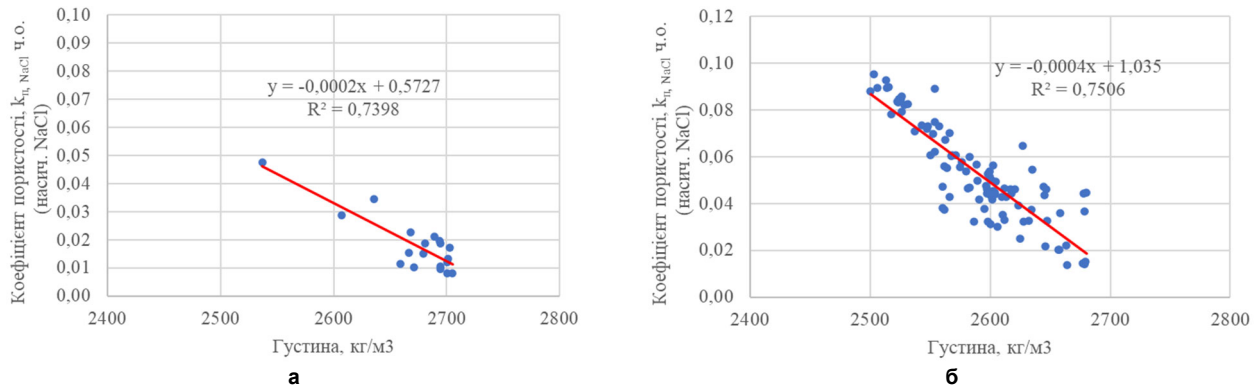


Рис. 2. Залежність коефіцієнта відкритої пористості порід ($K_{п,NaCl}$), визначеного методом насичення розчином NaCl, від густини (σ): а – алевроліти, б – пісковики

Структура пустотного простору порід визначалась способом центрифугування зразків за допомогою центрифуги ОС-6М. Шляхом аналізу кривих капілярного тиску (ККТ), отриманих за результатами центрифугування, визначено коефіцієнти залишкового

водонасичення ($K_{зв}$) та структура пустотного простору ущільнених порід. Дані про структуру пустотного простору і коефіцієнти залишкового водонасичення наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Межі змін і середні значення параметрів пустотного простору порід

Порода	Значення параметра	Вміст пор, %			Коефіцієнт залишкового водонасичення, $K_{зв}$
		надкапілярні	капілярні	субкапілярні	
Алевроліти	мін.	3	2	42	0,42
	макс.	27	31	98	0,98
	сер.	10	12	78	0,78
Пісковики	мін.	0	1	28	0,28
	макс.	37	64	99	0,99
	сер.	7	21	72	0,72

Типові криві капілярного тиску досліджених ущільнених порід з різними фільтраційно-ємнісними властивостями наведено на рис. 3а, б.

У результаті аналізу ККТ встановлено, що коефіцієнт залишкового водонасичення ущільнених порід змінюється: для алевролітів від 0,42 (алевроліт смугастий) до 0,98 (алевроліт темно-сірий) за його середнього значення 0,78, а для пісковиків – від 0,28 (піскови́к грубозернистий кварцовий) до 0,99 (піскови́к середньозернистий світло-сірий) за його середнього значення 0,72 (табл. 3). За визначеними коефіцієнтами залишкового водонасичення порід та існуючою відповідною класифікацією колекторів (Дахнов, 1975) розподіл досліджених зразків порід за класами їх колекторських властивостей такий: алевроліти належать до: III класу колекторів (нафтогазонасичення середнє, $K_{зв} = 0,3-0,5$) – 8 % зразків; IV класу (нафтогазонасичення низьке, $K_{зв} = 0,5-0,7$) – 8 % зразків та V класу (нафтогазонасичення

дуже низьке, $K_{зв} > 0,7$) – 84 % зразків. Відповідно, пісковики належать до: III класу колекторів – 15 % зразків; IV класу – 19% зразків та V класу – 66 % зразків.

Коефіцієнт ефективної пористості (табл. 2), визначений з використанням коефіцієнта залишкового водонасичення, змінюється: для алевролітів від 0,001 (алевроліт темно-сірий) до 0,011 (алевроліт темно-сірий) за його середнього значення 0,005, а для пісковиків – від 0,001 (піскови́к дрібнозернистий світло-сірий) до 0,072 (піскови́к середньозернистий) за його середнього значення 0,021.

Встановлено кореляційні залежності між коефіцієнтом залишкового водонасичення ($K_{зв}$) і коефіцієнтом ефективної пористості порід ($K_{п,еф}$), які мають лінійний характер:

$K_{п,еф} = -0,0185 \cdot K_{зв} + 0,019$, при $R^2 = 0,717$ – алевроліти;

$K_{п,еф} = -0,0863 \cdot K_{зв} + 0,0829$, при $R^2 = 0,803$ – пісковики.

Графіки цих залежностей наведено на рис. 4а, б.

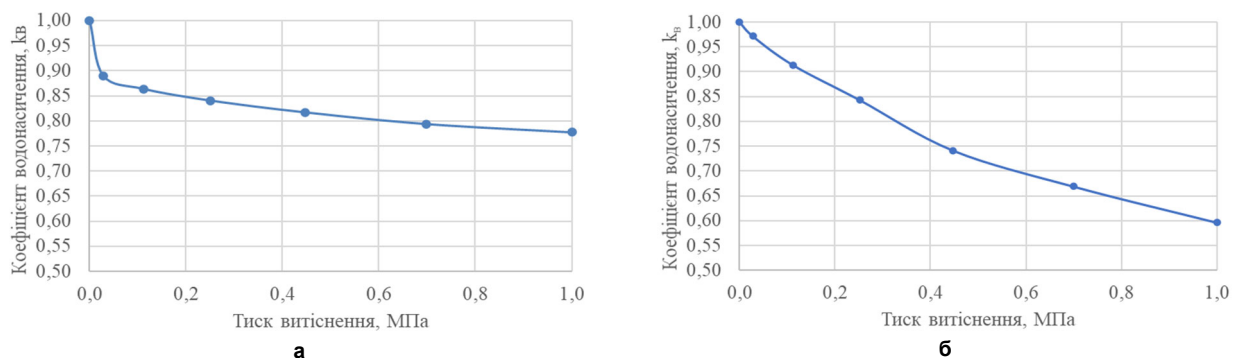


Рис. 3. Типова крива капілярного тиску: а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

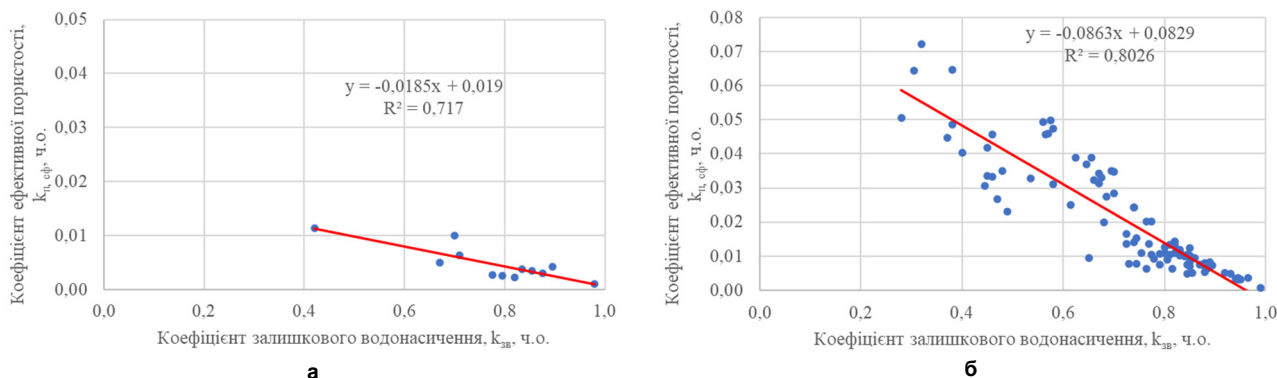


Рис. 4. Залежність коефіцієнта залишкового водонасичення ($K_{зв}$) від коефіцієнта ефективної пористості порід ($K_{н,эф}$): а – алевроліти, б – пісковики

Капілярметричні дослідження виконано методом центрифугування з використанням центрифуги ОС-6М, що дозволило оцінити структуру пустотного простору ущільнених порід за діаметром капілярів. Розподіл пустотного простору порід на субкапілярні (діаметр $< 0,2$ мкм), капілярні (діаметр $0,2-3$ мкм) та надкапілярні (діаметр $3-100$ мкм) пори (Нестеренко, 2010) наведені в табл. 3.

Субкапілярні порові канали участі у фільтрації флюїдів не беруть і, як правило, заповнені залишковою водою. Флюїди зосереджені у надкапілярних і капілярних порових каналах, можуть брати участь у фільтраційних процесах. У результаті лабораторних капілярметричних досліджень встановлено, що поровий простір досліджених порід має таку структуру: для алевролітів вміст надкапілярних пор змінюється від 3 % до 27 % за середнього значення 10 %; вміст капілярних пор – від 2 % до 31 % за середнього значення 12 %; вміст субкапілярних пор – від 42 % до 98 % за середнього значення 78 %; для пісковиків вміст надкапілярних пор змінюється від 0 % до 37 % за середнього значення 7 %; вміст капілярних пор – від 1 % до 64 % за середнього значення 21 %; вміст субкапілярних пор – від 28 % до 99 % за середнього значення 72 %.

Наведені дані свідчать, що за структурою пустотного простору досліджені ущільнені пісковики і алевроліти здебільшого мають досить низькі фільтраційні властивості, за винятком окремих зразків із середніми фільтраційними параметрами. При цьому досліджені пісковики відрізняються підвищеним вмістом капілярних пор порівняно з алевролітами.

Фізичне моделювання пластових умов виконувалось за допомогою установки високого тиску ВСЦ-1000. Ці дослідження дозволили оцінити коефіцієнт пористості досліджених порід у пластових умовах. Залежно від умов залягання порід при фізичному моделюванні

пластових умов ефективний тиск $p_{эф}$ становив $60-70$ МПа, а температура t змінювалась в межах $138-158^\circ\text{C}$. У результаті аналізу даних лабораторних досліджень пористості порід у змодельованих пластових умовах встановлено, що цей параметр для алевролітів змінюється від $0,007$ до $0,035$ за середнього значення $0,014$, а для ущільнених пісковиків – від $0,007$ до $0,084$ за середнього значення $0,045$ (табл. 2). Комплексні лабораторні дослідження дали змогу отримати кореляційні залежності між коефіцієнтами пористості в атмосферних (K_n) і пластових ($K_{н,пл.}$) умовах:

$K_{н,пл.} = 0,6614 \cdot K_n + 0,0021$, при $R^2 = 0,977$ – алевроліти;

$K_{н,пл.} = 0,9454 \cdot K_n - 0,0052$, при $R^2 = 0,993$ – пісковики.

Графіки цих залежностей, що мають лінійний вигляд, наведено на рис. 5а, б.

Під час моделювання пластових умов відбувається закриття мікротріщин під навантаженням, що спричиняє зменшення пористості порід порівняно з їх пористістю в атмосферних умовах. Аналіз даних показує, що відносне зниження (ε) коефіцієнта пористості за зміни атмосферних умов на пластові ($\varepsilon = |K_{н,пл.} - K_n| / K_n \cdot 100\%$) становить: для досліджених алевролітів від 10 % до 26,6 % за середнього значення 17,3 %, а для пісковиків – від 10 % до 23,2 % за середнього значення 15,3 %. Залежності відносного зниження (ε) коефіцієнта пористості ($K_{н,пл.}$) досліджених порід у пластових умовах від їх коефіцієнта пористості (K_n) в атмосферних умовах описуються показниковою функцією:

$\varepsilon = 118,99 \cdot K_n^{0,4729}$, при $R^2 = 0,814$ – алевроліти;

$\varepsilon = 2,2682 \cdot K_n^{-0,66}$, при $R^2 = 0,813$ – пісковики.

На рис. 6а, б наведено графіки цих залежностей.

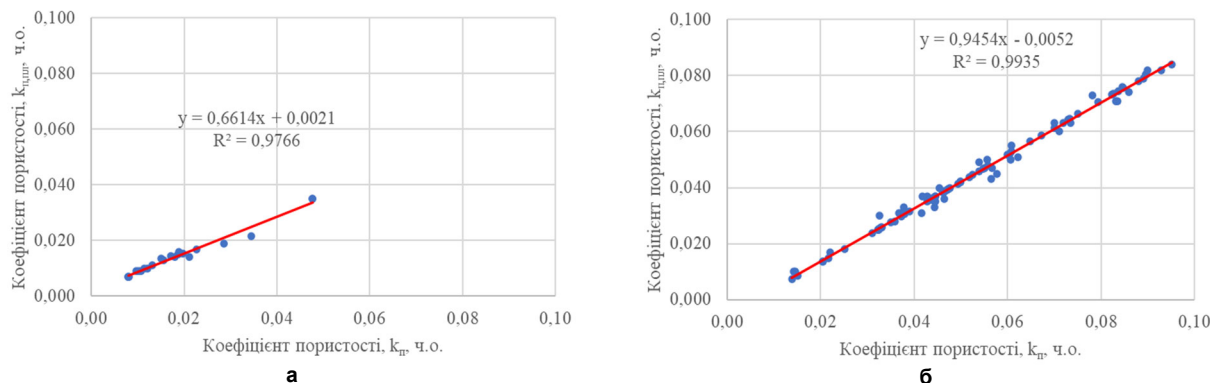


Рис. 5. Кореляційна залежність між коефіцієнтами пористості в атмосферних (K_n) і пластових ($K_{н,пл.}$) умовах: а – алевроліти, б – пісковики

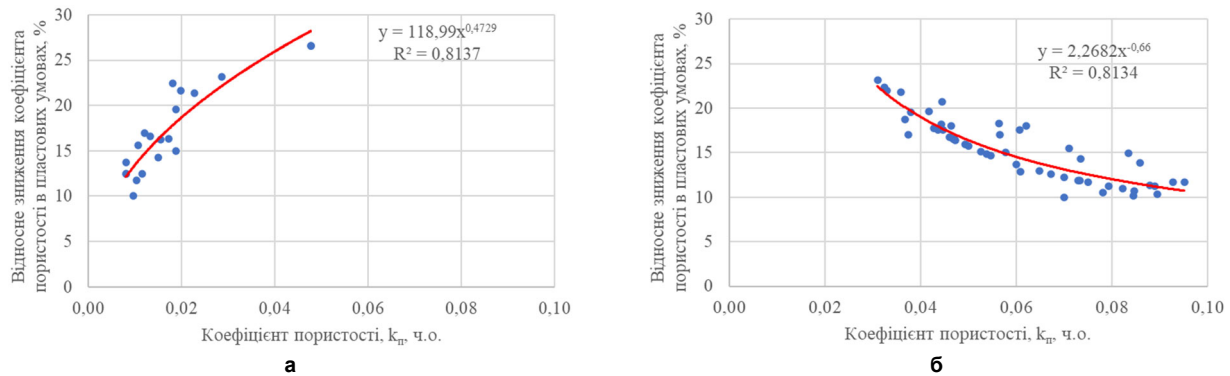


Рис. 6. Залежність відносного зниження (ϵ) коефіцієнта пористості ($k_{p,пл}$) у пластових умовах від їх коефіцієнта пористості (k_p) в атмосферних умовах: а – алевроліти, б – пісковики

Отримані дані свідчать, що відносне зниження коефіцієнта пористості за однакових пластових умов для алевролітів має пряму, а для пісковиків обернену залежності від коефіцієнта пористості в атмосферних умовах. Цей ефект імовірно пов'язаний з різною структурою пустотного простору досліджених алевролітів і пісковиків.

Проникність – властивість гірських порід, що характеризує їх здатність пропускати флюїди. Проникність порід контролюється розміром зерен породи, їх формою та просторовим розподілом за розмірами, а також їхньою упаковкою, ступенем глинистості, консолідації й цементації. На проникність також суттєво впливає тип глинистого або іншого цементувального матеріалу між піщаними зернами, особливо у разі присутності води. Деякі глинисті мінерали, зокрема монтморилоніт і смектит, розбухають у воді і можуть частково або повністю закупорювати пустотний простір (Туаб і Доналдсон, 2009; Порода..., 1985).

Коефіцієнт проникності $k_{пр}$ – параметр, який характеризує проникність породи. У випадку, коли порода на 100 % насичена одним флюїдом (фазою), таким як газ, нафта або вода, маємо абсолютну проникність для цього флюїду. У разі присутності у породи більше одного флюїду, проникність для кожного з них є фазовою, при цьому коефіцієнти проникності $k_{прг}$, $k_{прн}$, $k_{прв}$ характеризують ефективну фазову проникність для газу, нафти й води відповідно. У процесі руху по пустотних каналах

пластові флюїди взаємодіють між собою, гальмуючи один одного, тому сума ефективної проникності усіх трьох фаз завжди менша абсолютної проникності.

За літературними даними, проникність порід-колекторів нафти і газу змінюється в діапазоні від 0,1 до 1000 фм², інколи й більше. Клас колектора зумовлюється його проникністю, що поділяється на: низьку – $k_{пр} < 1$ фм², задовільну – $k_{пр} = 1-10$ фм², середню – $k_{пр} = 10-50$ фм², високу – $k_{пр} = 50-250$ фм² і дуже високу – $k_{пр} > 250$ фм² (Туаб і Доналдсон, 2009). Породи, що мають проникність нижче 1 фм² вважаються ущільненими. Низька проникність властива ущільненим газонасиченим пісковикам, алевролітам, аргілітам та матриці вапняків. Промислова розробка газонасичених ущільнених порід можлива шляхом застосування технологій інтенсифікації продуктивних товщ таких, як гідророзрив та кислотна обробка пласта. Ці заходи суттєво підвищують проникність ущільнених порід і дозволяють вести видобуток вуглеводнів із порід-колекторів, які раніше вважалися некондиційними.

Коефіцієнт проникності досліджених ущільнених пісковиків і алевролітів визначався методом стаціонарної фільтрації азоту (Порода..., 1985) за допомогою спеціально розробленої установки. Середня відносна похибка визначень коефіцієнта проникності становила 2,4 %. У табл. 4 наведено межі змін і середні значення коефіцієнта проникності досліджених пісковиків і алевролітів.

Таблиця 4

Межі змін і середні значення проникності порід

Порода	Значення параметра	Коефіцієнт проникності $k_{пр}$, фм ²
Алевроліти	мін.	0,001
	макс.	3,467
	сер.	0,685
Пісковики	мін.	0,003
	макс.	5,232
	сер.	0,462

Аналіз результатів лабораторних визначень коефіцієнта проникності порід показує, що цей параметр змінюється: для аргілітів від 0,001 фм² до 3,467 фм² за його середнього значення 0,685 фм², а для пісковиків від 0,003 фм² до 5,232 фм² за його середнього значення 0,462 фм². Згідно з існуючою класифікацією порід за їх проникністю (Дахнов, 1975) досліджені породи належать до V класу колекторів (проникність дуже низька, $k_{пр} < 1$ фм²) за винятком окремих зразків, з $k_{пр} > 1$ фм², що викликано наявністю в них тріщин.

Висновки. Одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ ущільнених колекторів ДДЗ є вивчення петрофізичних властивостей

низькопористих пісковиків і алевролітів, що зумовлює актуальність їх лабораторних досліджень. У статті висвітлено результати лабораторних досліджень колекторських властивостей глибокозатурених ущільнених колекторів карбону центрального грабена ДДЗ.

Встановлено, що об'ємна густина сухих порід змінюється: для алевролітів від 2535 кг/м³ до 2698 кг/м³ (середнє 2652 кг/м³), для пісковиків – від 2397 кг/м³ до 2663 кг/м³ (середнє 2530 кг/м³). Породи насичені моделлю пластової води мають густину: алевроліти від 2537 кг/м³ до 2705 кг/м³ (середнє 2673 кг/м³), а пісковики – від 2500 кг/м³ до 2680 кг/м³ (середнє 2589 кг/м³). Уявна мінералогічна густина алевролітів змінюється від 2586

до 2730 кг/м^3 (середнє 2699 кг/м^3), а пісковиків – від 2587 кг/м^3 до 2754 кг/м^3 (середнє 2670 кг/м^3). Мінливість як літологічного складу досліджених порід, так і пористості спричиняє варіації їхньої густини.

Коефіцієнт пористості, визначений гідростатичним способом, змінюється: для алевролітів від 0,008 до 0,048 (середнє 0,018), а для пісковиків – від 0,014 до 0,095 (середнє 0,053). Газоволюметричним способом установлено, що коефіцієнт відкритої пористості змінюється: для алевролітів від 0,012 до 0,07 (середнє 0,023), а для пісковиків – від 0,027 до 0,117 (середнє 0,07). За коефіцієнтом відкритої пористості досліджені породи відносяться до IV – V класів колекторів (пористість від низької до дуже низької) за виключенням окремих зразків із середньою пористістю (III клас), що викликано їх тріщинуватістю. Коефіцієнт ефективної пористості порід змінюється: для алевролітів від 0,001 до 0,011 (середнє 0,005), а для пісковиків – від 0,001 до 0,072 (середнє 0,021).

Визначений коефіцієнт залишкового водонасичення змінюється: для алевролітів від 0,42 до 0,98 (середнє 0,78), а для пісковиків – від 0,28 до 0,99 (середнє 0,72). За цим параметром розподіл досліджених зразків порід за класами їх колекторських властивостей такий: алевроліти належать до: III класу колекторів (нафтогазонасичення середнє) – 8 % зразків; IV класу (нафтогазонасичення низьке) – 8 % зразків та V класу (нафтогазонасичення дуже низьке) – 84 % зразків. Пісковики належать до: III класу колекторів – 15 % зразків; IV класу – 19 % зразків та V класу – 66 % зразків.

Структура капілярного простору досліджених порід, визначена шляхом капіляриметричних досліджень методом центрифугування, така: для алевролітів вміст надкапілярних пор змінюється від 3 % до 27 % (середнє 10 %); вміст капілярних пор – від 2 % до 31 % (середнє 12 %), вміст субкапілярних пор – від 42 % до 98 % (середнє 78 %); для пісковиків вміст надкапілярних пор змінюється від 0 % до 38 % (середнє 7 %); вміст капілярних пор – від 1 % до 64 % (середнє 21 %), вміст субкапілярних пор – від 28 % до 99 % (середнє 72 %). За структурою пустотного простору досліджені ущільнені пісковики і алевроліти здебільшого мають досить низькі фільтраційні властивості, за винятком окремих зразків із середніми фільтраційними параметрами. При цьому пісковики відрізняються підвищеним вмістом капілярних пор порівняно з алевролітами.

Коефіцієнт пористості порід у змодельованих пластових умовах змінюється: для алевролітів від 0,007 до 0,035 (середнє 0,014), а для ущільнених пісковиків – від 0,007 до 0,084 (середнє 0,045). Внаслідок закриття мікротріщин під навантаженням у пластових умовах пористість порід зменшується порівняно з пористістю в атмосферних умовах. Відносне зниження коефіцієнта пористості порід, що знаходяться в пластових умовах, становить: для алевролітів від 10 % до 26,6 % (середнє 17,3 %), а для пісковиків – від 10 % до 23,2 % (середнє 15,3 %). Відносне зниження коефіцієнта пористості в пластових умовах має для алевролітів пряму, а для пісковиків обернену залежність від коефіцієнта пористості в атмосферних умовах. Це ймовірно викликано різною структурою пустотного простору досліджених алевролітів і низькопористих пісковиків.

У результаті лабораторних досліджень коефіцієнта проникності порід встановлено, що цей параметр змінюється: для аргілітів у межах від $0,001 \text{ фм}^2$ до $3,467 \text{ фм}^2$ (середнє $0,685 \text{ фм}^2$), а для пісковиків від $0,003 \text{ фм}^2$ до $5,232 \text{ фм}^2$ (середнє $0,462 \text{ фм}^2$). За значеннями коефіцієнта проникності досліджені породи в основному

належать до V класу колекторів (проникність дуже низька, $K_{пр} < 1 \text{ фм}^2$) за винятком окремих зразків, з $K_{пр} > 1 \text{ фм}^2$, що спричинено наявністю в них тріщин.

Слід відзначити, що загалом досліджені алевроліти та ущільнені пісковики мають переважно низькі і дуже низькі фільтраційно-ємнісні властивості, за винятком окремих зразків. Тому розробка таких колекторів неможлива без застосування методів інтенсифікації пласта.

Виконаний кореляційний аналіз дозволив отримати ряд емпіричних залежностей між фільтраційно-ємнісними параметрами досліджених порід – густиною, коефіцієнтом пористості, коефіцієнтом ефективною пористості та коефіцієнтом залишкового водонасичення, а також встановити кореляційні залежності між коефіцієнтами пористості, вимірними в атмосферних та пластових умовах. Ці залежності можуть бути використані при інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин та моделюванні фільтраційно-ємнісних параметрів ущільнених порід-колекторів центрального грабена ДДЗ.

Список використаних джерел

- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2013). Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону. *Геоінформатика*, 3 (47), 1–9.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2014). Електричні параметри порід-колекторів імпактних структур. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 65, 31–35.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофизический журнал*, 36, 1, 145–157.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4 (83), 30–37.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019). Електричні параметри порід верхнього карбону Руновщинської площі Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2 (85), 37–45.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2020). Електричні та акустичні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2 (89), 49–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07>.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2021). Фільтраційно-ємнісні параметри ущільнених порід північної прибережної зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3 (94), 37–45. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04>.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В., Олійник, О.В. (2020). Фільтраційно-ємнісні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського нафтогазового району Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (88), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04>.
- Вижва, С.А., Онишук, Д.І., Онишук, В.І. (2012). Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 57, 13–16.
- Вижва, С.А., Орлюк, М.І., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Друкаренко, В.В., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019). Петрофізичні параметри порід візейського ярусу Лохвицької зони Дніпровсько-Донецької западини. *Геофизический журнал*, 41, 4, 145–160.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, І.І. (2017). Петрофизические особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79, 12–20.
- Дахнов, В.Н. (1975). Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. М.: Недра.
- Дортман, Н.Б. (1992а). Петрофизика. Справочник. Ч. 1. М.: Недра.
- Дортман, Н.Б. (1992б). Петрофизика. Справочник. Ч. 2. М.: Недра.
- ДСТУ 41-00032626-00-025-2000. (2001). Коефіцієнт залишкового водонасичення гірських порід. Методика виконання вимірювань методом центрифугування зразків. Київ: Мінекоресурсів України.
- Карпенко, О., Башкіров, Г., Карпенко, І. (2014). Визначення вмісту органічної речовини в гірських породах за геофізичними даними. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3 (66), 71–76. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.66.12>.
- Карпенко, О.М., Михайлов, В.А., Карпенко, І.О. (2015). До прогнозу освоєння вуглеводневих ресурсів східної частини ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (68), 49–54.

Maslov, B.P., Onyshchuk, I.I., Shynkarenko, A.V. (2017). Modelyuvannya neliniy-nih v'язko-pruzhnikh vlastyvostey terigenno-vapnyakovykh piskovykiv. *Visnyk Kyiv's'kogo natsional'nogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Geologiya*, 2 (77), 99–105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13>

Mykhailov, V.A., Vyzhva, S.A., Zagnitko, V.M. et al. (2014a). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. Книга IV. Київ: ВПЦ "Київський університет".

Mykhailov, V.A., Karpenko, O.M., Kurylo, M.M. et al. (2018). Горючі корисні копалини України та їхня геолого-економічна оцінка. Київ: ВПЦ "Київський університет".

Mykhailov, V.A., Karpenko, O.M., Ogar, V.V. (2015). Нафта і газ сланцевих порід, ущільнених колекторів, метан вугільних басейнів. Навчальний посібник. Київ: "Ніка-Центр".

Mykhailov, V.A., Kurovets, I.M., Synkovskyy, Ju.N. et al. (2014b). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Південний нафтогазоносний регіон. Книга III. Київ: ВПЦ "Київський університет".

Nesterenko, M.Yu. (2010). Петрофізичні основи обґрунтування флюїдонасичення порід-колекторів. Київ: УкрДГРІ.

Orlyuk, M.I., Pashkevich, I.K. (2011). Магнитная характеристика и разломная тектоника земной коры Шебелинской группы газовых месторождений как составная часть комплексных поисковых критериев углеводородов. *Геофизический журнал*, 33, 6, 136–151.

Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V. (2018). Прогноз шляхів проходження та місць накопичення вуглеводнів Чернігівського сегменту Дніпровсько-Донецького авлакогену за геомагнітними даними. *Геофизический журнал*, 40, 2, 123–140. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.12893>

Rybalka, S., Karpenko, O. (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. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08>

Sobol, V., Karpenko, O. (2021). Новая модель проницаемости теригенных гранулярных коллекторов на примере турнейских отложений Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (92), 61–66. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09>

Starostenko, V.I., Rusakov, O.M. (2015). Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Киев: "Галактика".

Tiab, D., Donaldson, E.C. (2009). Петрофізика: Теорія і практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. М.: "Премиум Инжиниринг".

Fedorishyn, D.D., Pyatkovska, I.O., Trubenko, O.M., Fedorishyn, S.D., Trubenko, A.O. (2018). Удосконалення методик виділення порід-колекторів складнопобудованих геологічних розрізів з використанням математичної статистики. XVII Міжнародна конференція "Геоінформатика: Теоретичні та прикладні аспекти", Київ, Україна.

Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I. (2018). Physical properties of deep reservoirs of the Glinsko-Solokhivsky oil and gas region. *XII Міжнародна наукова конференція "Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища"*, 13-16 листопада 2018 р., Київ, Україна.

Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I., Solodkyi E. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with the geomagnetic field and fault-block tectonics in the Hlynko-solokhivskyi oil-and-gas region. *Геодинаміка*, 2 (25), 71 – 88.

Vyzhva, S., Maslov, B., Onyshchuk, I., Kozionova, O. (2019). Hydraulic fracture crack propagation modeling in multi-component nonelastic geological media. *XIII Міжнародна наукова конференція "Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища"*, 12-15 листопада 2019, Київ, Україна. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903224>

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

Reference

Dakhnov, V.N. (1975). Geophysical methods for the determination of reservoir properties and oil and gas saturation of rocks. Moscow: Nedra. [in Russian]

Dortman, N. B. (Ed.). (1992b). Petrophysics. Handbook (Vol. 1). Moscow: Nedra. [in Russian]

Dortman, N. B. (Ed.). (1992a). Petrophysics. Handbook (Vol. 1). Moscow: Nedra. [in Russian]

Fedorishyn, D.D., Pyatkovska, I.O., Trubenko, O.N., Fedorishyn, S.D. (2018). Improved methods of allocation reservoir rock from complex constructed geological sections by using mathematical statistics. *17th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian]

GSTU 41-00032626-00-025-2000. (2001). Coefficient of residual water saturation of rocks. Method of measuring measurements by centrifugation of samples. Kyiv: Ministry of Natural Resources of Ukraine. [in Ukrainian]

Karpenko O., Bashkurov G., Karpenko I. (2014) Geophysical data: Estimating organic matter in rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(66), 71-76. DOI: 10.17721/1728-2713.66.12 [in Ukrainian]

Karpenko, O., Mykhailov, V., Karpenko, I. (2015). Eastern Dnieper-Donets depression: Predicting and developing hydrocarbon resources. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 68, 49-54. [in Ukrainian]

Maslov, B., Onyshchuk, I., Shynkarenko, A. (2017). Modelling of nonlinear viscoelastic properties of terrigenous-calcareous sandstones. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77, 99-105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13> [in Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Karpenko, O.M., Kurylo, M.M. et al. (2018). Fossil fuels of Ukraine and their geological and economic evaluation. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Karpenko, O.M., Ogar, V.V. (2015). Oil and gas of shale rocks and sealed collectors, methane of coal basins. Textbook. Kyiv: Nika-Centre. [in Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Kurovets, I.M., Synkovskyy, Ju.N. et al. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine: South oil and gas region. Book III. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Vyzhva, S.A., Zagnitko, V.M. et al. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine. Eastern oil-gas-bearing region: Analytical investigations. Book IV. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]

Nesterenko, M.Yu. (2010). Petrophysical basis of the substantiating of fluid saturation of reservoir rocks. Kyiv: UkrDHR. [in Ukrainian]

Orlyuk M., Drukarenko V., Onyshchuk I. (2018). Physical properties of deep reservoirs of the Glinsko-Solokhivsky oil and gas region. *XII International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, November 13-16, Kyiv, Ukraine. <http://doi.org/10.3997/2214-4609.201803178>

Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I., Solodkyi, E. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with the geomagnetic field and fault-block tectonics in the Hlynko-solokhivskyi oil-and-gas region. *Geodynamics*, 2 (25), 71-88. [in Ukrainian]

Orlyuk, M., Pashkevich, I. (2011). Magnetic characteristics and fault tectonics of the earth's crust of the Shebelinka group of gas fields as a component of the complex search criteria for hydrocarbons. *Геофизический журнал*, 33, 6, 136–151. [in Russian]

Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V. (2018). Prediction of pathways and places of accumulation for hydrocarbons of the Chernigiv segment of the Dnieper-Donets aulacogene in relation to magnetic heterogeneity. *Геофизический журнал*, 40, 2, 123-140. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.12893> [in Ukrainian]

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. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08> [in Ukrainian]

Sobol, V., Karpenko, O. (2021). A new model of permeability of terrigenous granular reservoirs on the example of turney deposits of Yablunivske oil and gas condensate field of the Dnieper-Donets basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(92), 61-66. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09> [in Ukrainian]

Starostenko, V.I., Rusakov, O.M. (2015). Tectonics and hydrocarbon potential of the crystalline basement of the Dnieper-Donetsk depression. Kyiv: Galaktika. [in Russian]

Tiab, D., Donaldson, E.C. (2009). Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport. Moscow: Premium Engineering. (Original work published 2004). [in Russian]

Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onyshchuk, D., Onyshchuk, I. (2014). Reservoir Rocks in Impact Structures: Electrical Parameters. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 65, 31-35. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onyshchuk, I. (2017). Petrophysical features of maikop series of the Crimean-Black Sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 79, 12-20. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.02> [in Russian]

Vyzhva, S., Maslov, B., Onyshchuk, I., Kozionova, O. (2019). Hydraulic fracture crack propagation modeling in multi-component nonelastic geological media. *XIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, November 12-15, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903224>

Vyzhva, S., Onyshchuk, D., Onyshchuk, V. (2012). Petroelectrical investigations of reservoir rocks of Western-Shebelynska gas condensate field. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 57, 13-16. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Oliynyk, O., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Lower Permian carbonate deposits reservoir parameters of western part of Hlynko-Solohivska area of Dnieper-Donets depression gas-oil-bearing district. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (88), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04> [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Orlyuk, M., Drukarenko, V., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Petrophysical parameters of rocks of the Visean stage (Lohvytsky zone of the Dnieper-Donets Depression). *Геофизический журнал*, 41, 4, 145–160. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177380> [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Electrical parameters of the upper carbon rocks (Runovshchynska area of the Dnieper-Donetsk basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (85), 37–45. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Electrical and acoustic parameters of lower Permian carbonate rocks (western part of the Hlynko-Solokhivskyi oil-and-gas region of the Dnieper-Donets)

basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (89), 49–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07>. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2021) Porosity and permeability properties of consolidated rocks of the northern near edge zone of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (94), 37–45. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04>. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., 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]

Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onyshchuk, D.I., Onyshchuk, I.I. (2014). Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donets depression promising for shale gas. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36, 2, 145–157. [in Ukrainian]

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

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

Надійшла до редколегії 07.12.21

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

RESERVOIR PROPERTIES OF DEEP-SEATED CONSOLIDATED ROCKS OF CARBONIFEROUS PERIOD OF THE CENTRAL GRABEN OF THE DNIEPER-DONETSK DEPRESSION

Paper concerns the researches of porosity and permeability properties of deep-seated consolidated rocks (siltstones, poor-porous sandstones) of Carboniferous period of the central graben of the Dnieper-Donetsk depression. The purpose of the research was to study the petrophysical parameters of the consolidated reservoir rocks, as the basis of the integrated analysis of their physical properties. Such reservoir parameters as the open porosity factor and void factor, permeability coefficient and residual water saturation factor have been studied. The article presents the limits of changes and the average values of porosity and permeability properties of rocks, and the classification of their reservoir properties. On the basis of capillarimetric research, an evaluation of the structure of the void space of rocks was made.

The correlation analysis has allowed establishing a series of empirical relationships between the reservoir parameters (density, porosity coefficient, effective porosity factor and residual water saturation factor) and, also, determining correlation dependences between porosity coefficients measured in atmospheric and reservoir conditions. These relationships can be used in the data interpretation of geophysical studies of wells and in the modeling of porosity and permeability properties of consolidated rocks of the central graben of the Dnieper-Donetsk depression.

Keywords: sandstones, siltstones, porosity and permeability properties, density, porosity coefficient, permeability coefficient, residual water saturation factor, correlation relationships.

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

КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ГЛУБОКОПОГРУЖЕННЫХ УПЛОТНЕННЫХ ПОРОД КАРБОНА ЦЕНТРАЛЬНОГО ГРАБЕНА ДДВ

Посвящено освещению результатов исследования фильтрационно-емкостных свойств глубокопогруженных уплотненных пород карбона (алевролитов, низкопористых песчаников) центрального грабена Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ). Цель исследований заключалась в изучении петрофизических параметров уплотненных пород-коллекторов как основы комплексного анализа их физических свойств. Исследованию подлежали такие фильтрационно-емкостные характеристики образцов пород как коэффициент открытой и эффективной пористости, коэффициент проницаемости и коэффициент остаточного водонасыщения. В статье приведены границы изменений и средние значения фильтрационно-емкостных параметров исследованных пород, а также классификация их коллекторских свойств. На основе капиллярметрических исследований выполнена оценка структуры пустотного пространства пород.

Проведенный корреляционный анализ позволил получить ряд эмпирических зависимостей между фильтрационно-емкостными параметрами исследованных пород – плотностью, коэффициентом пористости, коэффициентом эффективной пористости и коэффициентом остаточного водонасыщения, а также установить корреляционные зависимости между коэффициентами пористости, измеренными в атмосферных и пластовых условиях. Эти зависимости могут быть использованы при интерпретации данных геофизических исследований скважин и моделировании фильтрационно-емкостных параметров уплотненных пород-коллекторов центрального грабена ДДВ.

Ключевые слова: песчаники; алевролиты; фильтрационно-емкостные параметры; плотность; коэффициенты пористости, проницаемости, остаточного водонасыщения; корреляционные зависимости.

УДК 550.343.09

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.03>

О. Кендзера, канд. фіз.-мат. наук, член-кор. НАН України,
ORCID: 0000-0003-0691-0227,
E-mail: skendzera@gmail.com;

С. Микуляк, д-р фіз.-мат. наук, пров. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0002-5246-0960,
E-mail: mykulyak@ukr.net;

Ю. Семенова, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0003-4628-8663,
E-mail: ulaska@ukr.net;

І. Скуратівська, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0001-7129-4980,
E-mail: inna_skurativska@gmail.com;

С. Скуратівський, д-р фіз.-мат. наук, пров. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0003-4944-2646,
E-mail: skurserg@gmail.com;

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
пр. Ак. Палладіна, 32, м. Київ, 03680, Україна

РЕЗОНАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ ШАРУВАТОГО ҐРУНТОВОГО МАСИВУ, ЩО МІСТИТЬ ПРОШАРОК З КОЛИВНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

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

Присвячено моделюванню сейсмічної реакції неоднорідного ґрунтового масиву, який складається з трьох прошарків з можливими включеннями.

Опис поведінки ґрунтових товщ здійснюється на основі континуального підходу, в рамках якого динаміка середовища визначається системою рівнянь руху та рівнянь стану, де вказуються пружні або пружно-в'язкі властивості середовища. Класичні лінійні моделі є достатньо простими і добре верифіковані експериментально, але через складну будову реальних природних геосередовищ ці моделі не завжди можуть адекватно описувати хвильові процеси в них, що вимагає удосконалення моделей у напрямі врахування внутрішньої структури матеріалів.

Для опису зсувної динаміки неоднорідного ґрунтового масиву використовуються рівняння руху суцільного середовища у формі взаємно проникаючих континуумів, один з яких описується несучим середовищем Кельвіна-Фойгта, а інший – сукупністю невзаємодіючих часткових осциляторів. Як осцилятори можуть виступати різноманітні включення, тріщини чи порожнини, заповнені газами та/або рідинами. Рівняння руху доповнюються умовами сумісності на межах прошарків. Розглядається набір прошарків, серед яких лише один містить коливні включення. Розв'язується одновимірний крайовий задачі з вільною поверхнею та гармонічним законом деформування підоснови масиву. Використовуючи точний розв'язок крайової задачі, обчислено коефіцієнт підсилення зміщень для масивів з характеристиками, близькими до природних, а також розроблено ітераційну процедуру, що дає можливість записати кінцеву формулу для коефіцієнта підсилення у випадку шаруватого середовища з кількістю прошарків більше трьох. Показано, що врахування включень в одному з прошарків призводить до появи додаткової резонансної частоти, зсуву резонансів у низькочастотну область, виникнення зон із суттєвим послабленням резонансних піків. Отримані результати дозволяють удосконалити розрахункові методи визначення кількісних параметрів сейсмічної небезпеки при проведенні робіт із сейсмічного мікрорайонування будівельних і есплуатаційних майданчиків у сейсмічних районах України.

Ключові слова: амплітудно-частотна характеристика ґрунтів, резонансні властивості ґрунтів, неоднорідні середовища, методи моделювання реакції середовища на сейсмічні впливи.

Постановка проблеми. Сучасна концепція сейсмічного захисту населення та важливих об'єктів як території України, так і таких розвинутих країн, як Японія, США, Канада, Франція, Італія та ін., базується на сейсмостійкому проектуванні нових та зміцненні побудованих будинків і споруд, здатних забезпечити мінімізацію наслідків від майбутніх землетрусів. Заходи із сейсмічного захисту на території України регламентуються "Державними будівельними нормами України" – ДБН В.1.1-12:2014 (Будівництво..., 2014). Сучасні методи розрахунку сейсмостійкості будинків і споруд на сейсмічні навантаження потребують кількісних параметрів прогнозних сейсмічних коливань поверхні ґрунтової товщі, що лежить в основі досліджуваного об'єкту. Такі руйнівні землетруси, як Мехіко 1985 р., Спітак 1988 р., Нортрідж 1994 р., Кодакелі 1999 р., Непал 2015 р. та інші, яскраво продемонстрували сильний вплив місцевих ґрунтових умов на зміну амплітуди, частотного складу та тривалості сейсмічних коливань (Pehlivan et al., 2016). При поширенні сейсмічної хвилі від твердих корінних порід до приповерхневих м'яких розрізняють три основні механізми перетворення сейсмічних коливань (Yoshida, Iai, 1998; Павленко, 2009.): (i) підсилення коливань внаслідок переходу сейсмічних хвиль у верхні шари з меншими значеннями густини і швидкості (Aki and Richards, 1980;

Kramer, 1996); (ii) резонансні підсилення коливань, які виникають, коли частота коливань сейсмічної хвилі збігається з частотою власних коливань ґрунтових відкладів (у цьому випадку величина підсилення є залежною від контрастності сейсмічного імпедансу, тобто від співвідношення жорсткостей шарів ґрунтової товщі); (iii) послаблення сейсмічних коливань і пониження резонансних частот через нелінійні явища, спричинені нелінійним деформуванням ґрунту (як виняток – у водонасичених ґрунтах нелінійність залежності напруження-деформація може призводити і до збільшення амплітуд коливань за великих деформацій). Результатом дії розглянутих трьох механізмів зазвичай є підсилення слабких сейсмічних коливань у ґрунтах і ослаблення сильних (Yoshida and Iai, 1998). Крім того, як показали останні теоретичні дослідження (Кендзера та ін., 2020; Kendzera et al., 2020, 2021), неоднорідність ґрунтів також впливає як на амплітуду коливань поверхні ґрунтової товщі, так і на їх спектральний склад. У свою чергу, частотний склад сейсмічних коливань поверхні ґрунтової товщі має суттєвий вплив як на реакцію споруди в цілому, так і на реакцію окремих її конструкцій. Найнебезпечнішими є резонансні ефекти, за яких частотний склад коливань ґрунту і власні частоти структури є близькими. Гутенберґ був першим, хто розвинув ідею використання коефіцієнтів підсилення

сейсмічних коливань місцевими ґрунтами, розрахованих за записами мікросейсм на ділянках з різними ґрунтовими умовами (Gutenberg, 1927, 1957). Однак, незважаючи на переконливі докази існування впливу місцевих ґрунтових умов на підсилення та зміну спектра сейсмічних коливань, положення про врахування впливу місцевої геології на сейсмічний ефект, з'явилися в будівельних нормах лише в 1970-х роках. На сьогоднішній оцінка впливу місцевої приповерхневої геології (особливо м'яких відкладів) стала необхідною вимогою в програмах зменшення сейсмічної небезпеки і нормативних будівельних документів більшості країн. Однак різноманітність ґрунтових умов і механізмів трансформації сейсмічних хвиль у них робить цю задачу непростою. Нині існує багато методів оцінки впливу місцевої приповерхневої геології: експериментальні методи, емпіричні методи, розрахункові методи та статистичний аналіз існуючих акселерометричних даних. Кожний метод має свої переваги та обмеження. Емпіричні методи реєстрації сейсмічних подій засновані на вивченні даних слабких або сильних рухів, записаних на ділянках з різною місцевою геологією. При цьому використовуються відношення амплітудних спектрів записів коливань на досліджуваних ділянках відносно ділянок, складених твердими "еталонними ґрунтами". Однак емпіричні методи дають хороші результати лише при використанні записів сильних рухів, оскільки записи слабких рухів піддаються численним спотворенням, пов'язаним із фоновими мікросейсмами, технічними перешкодами і апаратними шумами (Boatwright et al., 1991; Field and Jacob 1995, Archuleta and Steidl, 1998). До того ж записи слабких рухів не відображають нелінійні ефекти, які виникають у ґрунтах під час сильних рухів. Тому емпіричні методи дають адекватні оцінки лише для регіонів з високою сейсмічністю. У регіонах зі слабкою та помірною сейсмічністю ймовірність реєстрації записів максимально можливих землетрусів вкрай мала, особливо за короткий час, відведений для інструментальних інженерно-сейсмологічних спостережень. Тому в цих регіонах більш широко застосовуються розрахункові методи. Головною перевагою математичного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні навантаження є можливість аналізувати велику вибірку можливих вхідних рухів. Однак математичне моделювання вимагає вичерпного розуміння інженерно-геологічної та геотехнічної інформації для кожної досліджуваної ділянки. Різноманітність ґрунтових умов робить задачу вдосконалення методів математичного моделювання вкрай актуальною для сейсмічного захисту населення та важливих об'єктів від землетрусів.

Задачі сейсмічного відгуку ґрунтових товщ розв'язуються в рамках континуальної моделі, в якій динаміка середовища описується системою диференціальних рівнянь руху та рівнянь стану. Найбільш відомими рівняннями стану, які використовуються у цих задачах, є рівняння, що описують пружні та пружно-в'язкі середовища: моделі Гука, Максвелла, Кельвіна-Фойгта (Kramer, 1996; Кендзера та ін., 2016). Вони є достатньо простими і добре верифіковані експериментально. Однак через надзвичайно складну будову реальних природних геосередовищ та їхню неоднорідність, класичні моделі не завжди можуть адекватно описувати динамічні, у т. ч. хвильові, процеси в них.

У цій роботі для опису хвильової динаміки ґрунтового середовища використовується модель, в якій неоднорідне середовище утворюється двома взаємопрониклими континуумами, один з яких є несучим

однорідним пружним середовищем, що описується рівняннями Ляме, а інший – це сукупність невзаємодіючих осциляторів (Пальмов, 1969; Слеп'ян, 1967; Даниленко та ін., 2008; Kendzera et al., 2020). Осцилятори тут моделюють різноманітні включення чи порожнини, заповнені газами та/або рідинами.

Разом з тим однією з типових властивостей природних ґрунтів є також їх шаруватість. Поєднання шаруватості та неоднорідності ґрунтів приводить до математичних моделей у формі систем диференціальних рівнянь, які пов'язані додатковими умовами сумісності на границях прошарків. У роботі (Kendzera et al., 2021) було сформульовано крайову задачу для шаруватого середовища, кожний прошарок якого містить коливні включення, а несуче середовище є пружним. Застосовуючи числові та аналітичні методи дослідження крайової задачі, вдалося побудувати залежності коефіцієнта підсилення від частоти вхідного сигналу та характеристик шаруватого геосередовища, порівняти результати числового та аналітичного підходів, а також встановити основні ефекти, зумовлені врахуванням динаміки включень.

У цій роботі продовжуються дослідження сейсмічного відгуку шаруватого ґрунтового масиву. Тут несуче середовище кожного прошарку є в'язко-пружним середовищем, що описується моделлю Кельвіна-Фойгта, а прошарки можуть бути як із включеннями, так і без них. При цьому параметри моделі вибираються близькими до величин, властивих природним ґрунтам.

Метою роботи є оцінка сейсмічної реакції шаруватого ґрунтового товщі, коли прошарки описуються моделями Кельвіна-Фойгта з врахуванням коливних включень.

Постановка задачі. Розглядається ґрунтовий масив з коливними включеннями (рис. 1) та глибиною H , який складається з трьох шарів із товщинами h_s , $s = 1, 2, 3$.

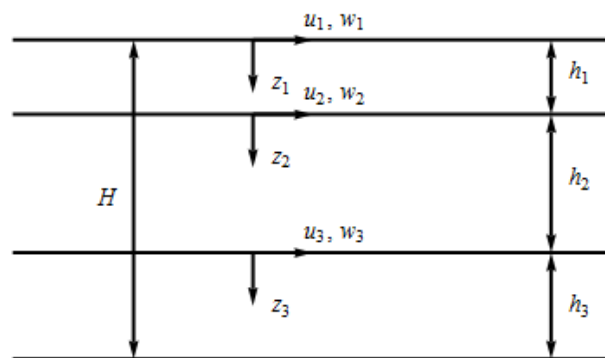


Рис. 1. Схема тришарового ґрунтового масиву

Кожен шар є складним середовищем, утвореним класичним несучим середовищем густиною ρ_s з розташованими у ньому невзаємодіючими осциляторами. Множина осциляторів утворює додатковий континуум з густиною $m_s \rho_s$. У кожному шарі введено власну систему координат. Тоді модель середовища з коливними включеннями для зсувних деформацій має вигляд

$$\rho_s (u_s)_t = (G_s (u_s)_z)_z - \rho_s m_s (w_s)_t + \eta_s (u_s)_{zzt},$$

$$(w_s)_t + \Omega_s^2 (w_s - u_s) + \Omega_s^2 \tau_s (w_s - u_s)_t = 0, \quad (1)$$

де $u_s(z_s, t)$ – горизонтальне зміщення основного середовища на глибині z_s , $w_s(z_s, t)$ – горизонтальне

зміщення осцилятора, G_s – модуль зсуву, η_s – коефіцієнт в'язкості, Ω_s – частота осцилятора, τ_s – час релаксації осцилятора. Слід зазначити, що несуче середовище у рівнянні руху (1), на відміну від моделей роботи (Kendzera et al., 2021), є середовищем Кельвіна–Фойгта. Тут розглядаються зсувні деформації, оскільки вони є найбільш небезпечними для будівель і споруд.

До рівнянь руху додаються такі крайові умови: відсутнє напруження на поверхні (вільна поверхня) $\frac{\partial u_1}{\partial z_1}(z_1 = 0) = 0$, зміщення на підшві визначається гар-

монічним законом $u_3(z_3 = H) = e^{i\omega t}$, де $H = \sum_s h_s$, ω –

частота зовнішнього збурення. Відгук тришарової системи будемо описувати в термінах коефіцієнта підсилення F (Kramer, 1996):

$$F = \frac{u_1(z = 0; t)}{u_3(z = H; t)}, \quad (2)$$

де $u_1(z = 0; t)$ та $u_3(z = H; t)$ є деформаціями на поверхні та на глибині H відповідно.

Для обчислення F побудуємо розв'язок відповідної крайової задачі (1). Для цього розв'язок у кожному шарі будемо шукати у вигляді

$$u = U_0 e^{i(\omega t - kz)}, \quad w = W_0 e^{i(\omega t - kz)},$$

де U_0 , W_0 – ненульові сталі. Тоді умовою існування нетривіального розв'язку є рівність

$$\begin{vmatrix} \rho_s \omega^2 - G_s k_s^2 - \eta_s i k_s^2 \omega & \rho_s m_s \omega^2 \\ -\Omega_s^2 - \Omega_s^2 \tau_s i \omega & \Omega_s^2 + \Omega_s^2 \tau_s i \omega - \omega^2 \end{vmatrix} = 0,$$

яка визначає дисперсійне співвідношення прошарку

$$k_s^2 = \frac{\rho_s \omega^2}{(G_s + \eta_s i \omega)} \left(1 + \frac{m_s (1 + \tau_s i \omega)}{1 + \tau_s i \omega - \frac{\omega^2}{\Omega_s^2}} \right). \quad (3)$$

Спираючись на принцип суперпозиції, розв'язки системи (1) у відповідному шарі шукатимемо у вигляді

$$u_1 = (A_1 e^{ik_1 z_1} + B_1 e^{-ik_1 z_1}) e^{i\omega t}, \quad u_2 = (A_2 e^{ik_2 z_2} + B_2 e^{-ik_2 z_2}) e^{i\omega t},$$

$$u_3 = (A_3 e^{ik_3 z_3} + B_3 e^{-ik_3 z_3}) e^{i\omega t}. \quad (4)$$

Для визначення коефіцієнтів A_j , B_j , $j = 1, 2, 3$ використаємо крайові умови: вільна поверхня, збурення на підшві, неперервність зміщення та неперервність сил:

$$u_{1z_1}(z_1 = 0) = 0, \quad u_1(z_1 = h_1) = u_2(z_2 = 0),$$

$$u_2(z_2 = h_2) = u_3(z_3 = 0),$$

$$G_1^* u_{1z_1}(z_1 = h_1) = G_2^* u_{2z_2}(z_2 = 0),$$

$$u_3(z_3 = h_3) = e^{i\omega t}. \quad (5)$$

Після підстановки формул (4) у співвідношення (5) та спрощень отримаємо

$$A_1 = B_1, \quad A_3 e^{ik_3 h_3} + B_3 e^{-ik_3 h_3} = 1,$$

$$A_1 (e^{ik_1 h_1} + e^{-ik_1 h_1}) = A_2 + B_2,$$

$$A_2 e^{ik_2 h_2} + B_2 e^{-ik_2 h_2} = A_3 + B_3,$$

$$\frac{G_1^* k_1}{G_2^* k_2} A_1 (e^{ik_1 h_1} - e^{-ik_1 h_1}) = A_2 - B_2,$$

$$\frac{G_2^* k_2}{G_3^* k_3} (A_2 e^{ik_2 h_2} - B_2 e^{-ik_2 h_2}) = A_3 - B_3. \quad (6)$$

Надалі використаємо позначення $\frac{G_s^* k_s}{G_{s+1}^* k_{s+1}} = \mu_s$,

$k_s h_s = \phi_s$. Оскільки $\frac{G_s^* k_s}{G_{s+1}^* k_{s+1}} = \frac{v_s^* \rho_s}{v_{s+1}^* \rho_{s+1}}$, то з врахуванням

того що величина $Z = \rho v$ є хвильовим імпедансом, введені параметри μ_s є відношеннями імпедансів прошарків. Тоді систему (6) запишемо у вигляді

$$A_1 = B_1, \quad A_3 e^{i\phi_3} + B_3 e^{-i\phi_3} = 1,$$

$$A_1 (e^{i\phi_1} + e^{-i\phi_1}) + \mu_1 A_1 (e^{i\phi_1} - e^{-i\phi_1}) = 2A_2,$$

$$A_1 (e^{i\phi_1} + e^{-i\phi_1}) - \mu_1 A_1 (e^{i\phi_1} - e^{-i\phi_1}) = 2B_2,$$

$$A_2 e^{i\phi_2} + B_2 e^{-i\phi_2} + \mu_2 (A_2 e^{i\phi_2} - B_2 e^{-i\phi_2}) = 2A_3,$$

$$A_2 e^{i\phi_2} + B_2 e^{-i\phi_2} - \mu_2 (A_2 e^{i\phi_2} - B_2 e^{-i\phi_2}) = 2B_3. \quad (7)$$

У свою чергу система (7) із застосуванням формул Ейлера набуде вигляду

$$A_1 = B_1, \quad A_2 = A_1 (\cos \phi_1 + i\mu_1 \sin \phi_1),$$

$$B_2 = A_1 (\cos \phi_1 - i\mu_1 \sin \phi_1),$$

$$A_3 = A_1 \left(\cos \phi_1 \cos \phi_2 - \mu_1 \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \right.$$

$$\left. + i\mu_2 \cos \phi_1 \sin \phi_2 + i\mu_2 \mu_1 \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right),$$

$$B_3 = A_1 \left(\cos \phi_1 \cos \phi_2 - \mu_1 \sin \phi_1 \sin \phi_2 - \right.$$

$$\left. - i\mu_2 \cos \phi_1 \sin \phi_2 - i\mu_2 \mu_1 \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right),$$

$$A_3 e^{i\phi_3} + B_3 e^{-i\phi_3} = 1.$$

Останнє рівняння отриманої системи дозволяє визначити амплітуду на поверхні

$$A_1 = \frac{1}{2 \left(\cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos \phi_3 - \mu_1 \sin \phi_1 \sin \phi_2 \cos \phi_3 - \right.}$$

$$\left. - \mu_2 \cos \phi_1 \sin \phi_2 \sin \phi_3 - \mu_2 \mu_1 \sin \phi_1 \cos \phi_2 \sin \phi_3 \right)}.$$

Тоді згідно з формулою (2) коефіцієнт підсилення

$$F = \frac{1}{|K \cos \phi_3 - \mu_2 S \sin \phi_3|}, \quad (8)$$

де

$$K = \cos \phi_1 \cos \phi_2 - \mu_1 \sin \phi_1 \sin \phi_2,$$

$$S = \cos \phi_1 \sin \phi_2 - \mu_1 \sin \phi_1 \cos \phi_2.$$

З формули (8) можна отримати відомі частинні випадки для:

(а) одношарового масиву, коли $h_2 = h_3 = 0$, тоді

$$F = \frac{1}{\cos \phi_1};$$

(б) двошарового масиву, коли $h_3 = 0$, тоді

$$F = \frac{1}{\cos \phi_1 \cos \phi_2 - \mu_1 \sin \phi_1 \sin \phi_2}.$$

Загалом, варто зазначити, що формула (8) спрощується у випадку, коли параметри $\mu_s = 1$, тобто коли хвильові імпеданси прошарків попарно рівні між собою. Тоді,

наприклад, для двошарового масиву $F = \frac{1}{|\cos(\phi_1 + \phi_2)|}$,

а для тришарового $F = \frac{1}{|\cos(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)|}$. Аналізуючи

отримані формули, можна зробити припущення, що для

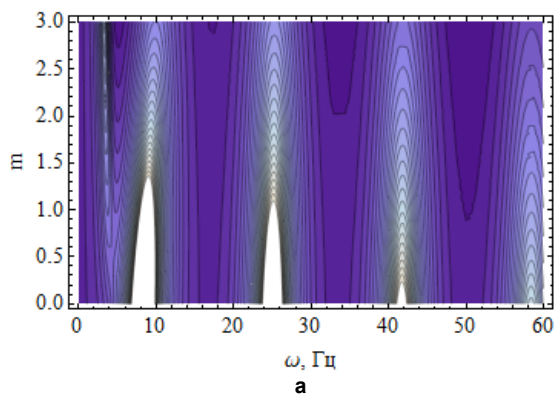
N -шарового прошарку $F = \frac{1}{|\cos(\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_N)|}$.

Якщо імпеданси прошарків попарно не однакові, тоді загальну формулу можна записати з використанням ітераційних операторів, які переозначають відомі тригонометричні формули

$$\begin{aligned} cs_k \left(\sum_{j=1}^{k-1} \phi_j + \phi_k \right) &:= \\ &= cs_{k-1} \left(\sum_{j=1}^{k-1} \phi_j \right) \cos \phi_k - \mu_{k-1} ss_{k-1} \left(\sum_{j=1}^{k-1} \phi_j \right) \sin \phi_k, \\ ss_k \left(\sum_{j=1}^{k-1} \phi_j + \phi_k \right) &:= \\ &= cs_{k-1} \left(\sum_{j=1}^{k-1} \phi_j \right) \sin \phi_k + \mu_{k-1} ss_{k-1} \left(\sum_{j=1}^{k-1} \phi_j \right) \cos \phi_k, \\ cs_2(\phi_1 + \phi_2) &:= \cos \phi_1 \cos \phi_2 - \mu_1 \sin \phi_1 \sin \phi_2, \\ ss_2(\phi_1 + \phi_2) &:= \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \mu_1 \sin \phi_1 \cos \phi_2. \end{aligned}$$

Тоді $F = \frac{1}{|cs_N(\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_N)|}$.

Надалі розглянемо вплив структури тришарового середовища на профіль функції F . Тип прошарків



будемо задавати за допомогою коефіцієнтів m_j та η_j .

Зокрема, розглянемо середовище, для якого

$$\{m_1; m_2; m_3\} = \{0; m; 0\}, \quad \{\eta_1; \eta_2; \eta_3\} = \{0.05; 0.02; 0.05\}.$$

Отже, для першого та третього середовищ вплив динаміки включень на несуче середовище не враховується, до уваги береться лише затухання. Друге середовище цілком враховує динаміку включень. Такий набір параметрів відповідає шаруватому середовищу, коли прошарок з коливними включеннями міститься між прошарками Кельвіна–Фойгта. Інші параметри задаємо такими:

$$\rho_s = 1600 \text{ кг/м}^3, \quad v_s = 300 \text{ м/с}.$$

Тоді $G_s = \rho_s v_s^2 = 1.44 \cdot 10^8 \text{ Па}$. Ці параметри є характерними для пісків поблизу Канівської ГЕС.

Для опису динаміки включень вважатимемо, що їх власна частота коливаний $\{\Omega_1; \Omega_2; \Omega_3\} = \{0; \Omega; 0\} \text{ 1/с}$, а час релаксації $\{\tau_1; \tau_2; \tau_3\} = \{0; 0.02; 0\} \text{ с}$. Нехай товщини прошарків $\{h_1; h_2; h_3\} = \{2; 5; 2\} \text{ м}$.

Надалі для частоти зовнішнього збурення та часткового осцилятора використовується одиниця вимірювання герц, що передбачає перехід від [рад/с] до [Гц] за формулами $\{\tilde{\omega}, \tilde{\Omega}\} = 2\pi\{\omega, \Omega\}$. Обчислимо значення функції (8) у залежності від двох величин m та ω . Для аналізу особливостей функції $F(\omega, m)$ побудуємо сукупність її ліній рівня за допомогою вбудованої команди ContourPlot[...] з пакету Mathematica. Отриманий рис. 2а дозволяє проаналізувати зміну профілю функції F із зростанням параметра m . Темніші області рисунка відповідають меншим значенням F , тоді як зона білого кольору відповідає найбільшому максимуму.

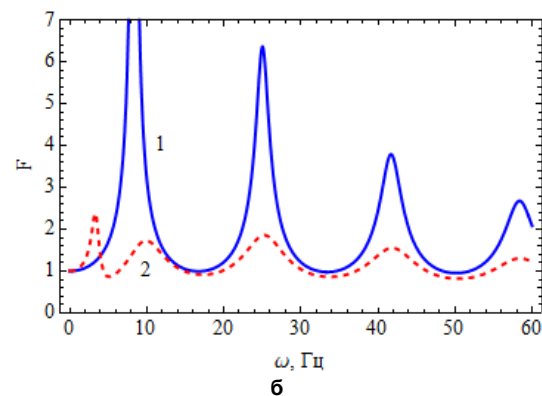


Рис. 2. Сукупність ліній рівня функції $F(\omega, m)$ (а), а також профілі $F(\omega, m=0)$ (суцільна лінія 1) та $F(\omega, m=3)$ (штрихова лінія 2) (б)

Для зручності аналізу, на рис. 2б зображено профілі функції F за фіксованих значень m , які відповідають найменшому та найбільшому значенню m з рис. 2а. Зокрема, значення $m=0$ (суцільна крива на рис. 2а) відповідає середовищу без врахування коливних включень, тобто середовищу Кельвіна–Фойгта. У такому випадку профіль F є добре відомим (Kramer, 1996) і містить один превалюючий максимум та послідовність суттєво менших піків у інтервалі більших частот. Як тільки $m \neq 0$, структура низькочастотної частини функції F

зазнає змін. Як випливає з аналізу рис. 2а, ліворуч від першого піку починає розвиватись додатковий максимум. Його інтенсивність зростає при збільшенні m . Тобто поява включень зумовлює розвиток додаткової резонансної частоти. До того ж цей максимум стає більш виразним, коли $m > 1$, тобто включення мають густину більшу, ніж несуче геосередовище. Важливо, що при зростанні m інтенсивність максимуму, характерного для моделі Кельвіна–Фойгта, знижується і виникає ситуація, коли цей максимум за висотою подібний до додаткового максимуму, як це показано на рис. 2б (штрихова лінія).

Тобто можна вважати, що спостерігається розпад максимуму. Поява додаткового піка означає існування додаткової низької резонансної частоти прошарку, що необхідно враховувати при проведенні будівництва на таких ґрунтах.

Інший параметр, який керує динамікою включень, є власна частота осциляторів Ω . Розглянемо, як впливає на форму кривої F зміна Ω . Зафіксуємо значення $m = 0,8$ та побудуємо сукупність ліній рівня $F(\omega, \Omega)$, коли Ω змінюється в інтервалі від 1 до 30 Гц, тоді як ω – від 0 до 60 Гц (рис. 3а). Так само темні області відповідають меншим значенням F , зони білого кольору позначають положення піків.

На рис. 3б зображено профілі F для крайніх значень Ω . Зокрема, при $\Omega = 4$ Гц (суцільна крива 1, рис. 3б)

профіль F містить 4 піки, яким відповідають білі зони на рис. 3а, та один слабкий пік, що відповідає додатковому максимуму. Помітно, що додатковий максимум на профілі 1 (рис. 3б) зникає для великих Ω , як це видно на профілі 2 (штрихова лінія).

Як впливає з аналізу рис. 3а, зростання Ω спричинює поступове згасання високочастотних піків. Більш того, існує інтервал частот Ω , для якого максимальні значення функції F значно менші, ніж для інших Ω . Таку область значень Ω та ω зображено більш детально на рис. 4а, який свідчить про складну геометричну будову та її трансформацію за взаємної зміни Ω та ω . Додаткове розуміння будови функції F забезпечує аналіз характерних профілів F , зображених на рис. 4б, отриманих для $\Omega = 4, 6, 8$ Гц.

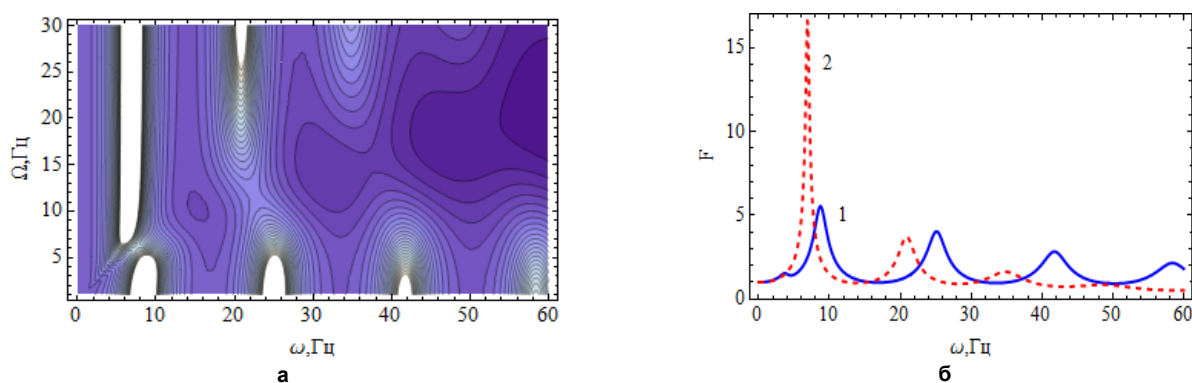


Рис. 3. Сукупність ліній рівня функції $F(\omega, \Omega)$ (а), а також профілі $F(\omega, \Omega = 4$ Гц) (суцільна лінія 1) та $F(\omega, \Omega = 30$ Гц) (штрихова лінія 2) (б)

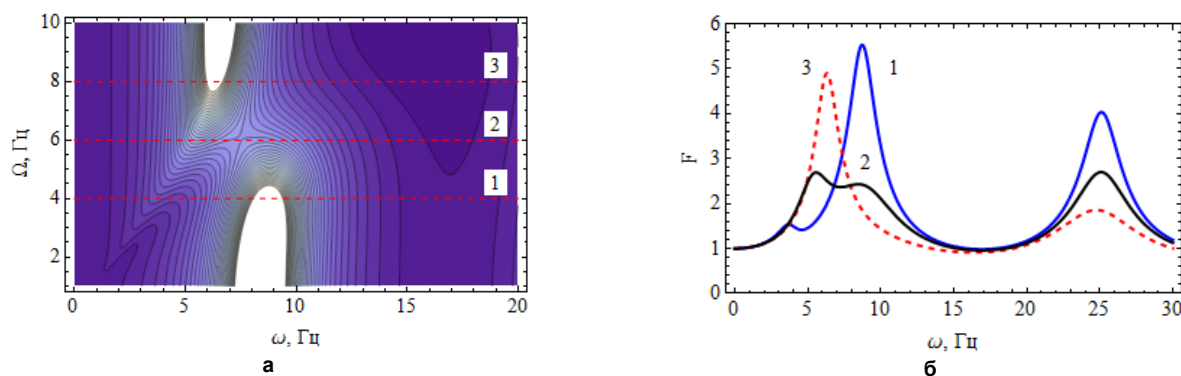


Рис. 4. а – Збільшення відповідної області з рис. 3. б: Профілі F за фіксованих значень Ω : лінія 1 (суцільна) відповідає значенню $\Omega = 4$ Гц, лінія 2 (суцільна) – $\Omega = 6$ Гц, лінія 3 (штрихова) відповідає значенню $\Omega = 8$ Гц.

Вказані значення Ω позначено на рисунку (а) штриховими горизонтальними лініями

Отже, при зростанні Ω найбільший максимум зменшується, а додатковий максимум ліворуч зростає, поки вони не стануть однаковими. Подальше збільшення Ω спричинює зростання додаткового максимуму та зникнення початкового максимуму. Інші максимуми поведуться подібним чином, тільки інтервал Ω , у межах якого цей процес відбувається, значно ширший (рис. 3а). Як наслідок – за великих Ω максимумів стає менше і вони зміщуються у бік нижчих частот ω .

Висновки. Отже, побудовано оцінку сейсмічної реакції шаруватого ґрунтового масиву на основі обчислення коефіцієнта підсилення з використанням моделі в'язкопружного середовища з осцилюючими включеннями. При цьому для коефіцієнта підсилення отримано аналітичний вираз, що є важливим для аналізу та практичного застосування. Більш того, вдалося вказати ітераційну процедуру, яка дає змогу записати кінцеву формулу для коефіцієнта підсилення, коли кількість прошарків більше трьох. Проведені дослідження показали, що врахування коливної динаміки включень при моделюванні зсувних

процесів у шаруватому середовищі виявляє нові ефекти в задачі про коливання ґрунтової шаруватої товщі. Зокрема, показано, що

- такий шаруватий масив може характеризуватись додатковою резонансною частотою, яка розташована у низькочастотній частині спектра, як це видно на рис. 2–4;
- спостерігається зсув резонансів у низькочастотну область (рис. 3–4);
- виявлено виникнення зон із суттєвим послабленням резонансних піків (рис. 4).

Останній висновок є важливим для розробки заходів щодо забезпечення сейсмобезпеки при проектуванні, будівництві та експлуатації.

Робота частково фінансується за НДР 0118U000044.

Список використаних джерел

- Будівництво в сейсмічних районах України ДБН В.1.1-12:2014. (2014). Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 110 с.
- Даниленко, В.А., Скуратівський, С.І. (2008). Резонансні режими поширення нелінійних хвильових полів в середовищах з коливними включеннями. *Доповіді НАН України*, 11, 108–112.
- Кендзера, О.В., Микуляк, С.В., Семенова, Ю.В., Скуратівський, С.І. (2020). Моделювання сейсмічної реакції прошарку ґрунту в рамках нелокальної моделі суцільного середовища. *Геофізичний журнал*, 42 (3), 47–58.
- Кендзера, В.А., Семенова, Ю.В. (2016). Влияние резонансных и нелинейных свойств грунтов на сейсмическую опасность строительных площадок. *Геофизический журнал*, 2 (38), 3–18.
- Павленко, О.В. (2009). Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. Москва: Научный мир, 260 с.
- Пальмов, В.А. (1969). Об одной модели среды сложной структуры. *Прикл. мат. и мех.*, 69 (4), 768–773.
- Слепьян, Л.И. (1967). Волна деформаций в стержне с амортизированными массами. *Механика твердого тела*, 5, 34–40.
- Aki, K., Richards, P. (1980). Quantitative seismology: Theory and methods. la. ed, San Francisco (EEUU): Freeman and Company, 1, 557 p.
- Archuleta, R.J., Steidl, J.H. (1998). ESG studies in the United States: results from borehole arrays. In K. Irikura, K. Kudo, H. Okada, and T. Sasatani (Eds.) *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Vol. 1. BAKLEMA, Rotterdam, 3–14.
- Boatwright, J., Seekins, L. C., Mueller, C.S. (1991). Ground motion amplification in the Marina. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 1117–1131.
- Field, E.H., Jacob, K.H. (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 4, 1127–1143.
- Gutenberg, B. (1927). Grundlagen der Erdbebenkunde. Berlin.
- Gutenberg, B. (1957). Effects of ground on earthquake motion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 47, 221–250.
- Kendzera, O.V., Mykulyak, S.V., Semenova, Yu.V., Skurativska, I.A., Skurativskiy, S.I. (2020). Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*, 42 (4), 47–58.
- Kendzera, O.V., Mykulyak, S.V., Semenova, Yu.V., Skurativska, I.A., Skurativskiy, S.I. (2021). Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*, 43 (2), 3–13.

O. Kendzera, PhD (Phys.-Math.), corresponding member of NASU,

ORCID: 0000-0003-0691-0227,

E-mail: skendzera@gmail.com;

S. Mykulyak, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher,

ORCID: 0000-0002-5246-0960,

E-mail: mykulyak@ukr.net;

Yu. Semenova, PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher,

ORCID: 0000-0003-4628-8663,

E-mail: ulaska@ukr.net;

I. Skurativska, PhD (Tech.), Senior Researcher,

ORCID: 0000-0001-7129-4980,

E-mail: inna_skurativska@gmail.com;

S. Skurativskiy, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher,

ORCID: 0000-0003-4944-2646,

E-mail: skurserg@gmail.com;

Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 03680, Ukraine

Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.

Pehlivan, M., Rathje, E.M., Gilbert, R.B. (2016). Factors influencing soil surface seismic hazard curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83, 180–190.

Yoshida, N., Iai, S., (1998). Nonlinear site response and its evaluation and prediction. *Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, 71–90.

References

- Aki, K., Richards, P. (1980). Quantitative seismology: Theory and methods. la. ed, San Francisco (EEUU): Freeman and Company, 1, 557 p.
- Archuleta, R.J., Steidl, J.H. (1998). ESG studies in the United States: results from borehole arrays. In K. Irikura, K. Kudo, H. Okada, and T. Sasatani (Eds.) *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Vol. 1. BAKLEMA, Rotterdam, 3–14.
- Boatwright, J., Seekins, L. C., Mueller, C.S. (1991). Ground motion amplification in the Marina. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 1117–1131.
- Construction in seismic regions of Ukraine SBS I.1.1-12: 2014. (2014). Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 110 p. [in Ukrainian]
- Danilenko, V.A., Skuratovsky, S.I. (2008). Resonant modes of propagation of nonlinear wave fields in media with vibrating inclusions. *Reports of the NAS of Ukraine*, 11 108–112. [in Ukrainian]
- Field, E.H., Jacob, K.H. (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 4, 1127–1143.
- Gutenberg, B. (1927). Grundlagen der Erdbebenkunde. Berlin.
- Gutenberg, B. (1957). Effects of ground on earthquake motion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 47, 221–250.
- Kendzera, V.A., Semenova, Yu.V. (2016). The influence of resonant and nonlinear soil properties on the seismic hazard of construction sites. *Geophysical Journal*, 2 (38), 3–18. [in Russian]
- Kendzera, O.V., Mikulyak, S.V., Semenova, Yu.V., Skuratovsky, S.I. (2020). Modeling the seismic response of the soil layer in the framework of a non-local model of a continuous medium. *Geophysical Journal*, 42 (3), 47–58. [in Ukrainian]
- Kendzera, O.V., Mykulyak, S.V., Semenova, Yu.V., Skurativska, I.A., Skurativskiy, S.I. (2020). Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*, 42 (4), 47–58.
- Kendzera, O.V., Mykulyak, S.V., Semenova, Yu.V., Skurativska, I.A., Skurativskiy, S.I. (2021). Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*, 43 (2), 3–13.
- Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
- Palmov, V.A. (1969). About one model of the environment with a complex structure. *App. mat. and fur.*, 69 (4), 768–773. [in Russian]
- Pavlenko, O.V. (2009). Seismic waves in soil layers: nonlinear behavior of soil during strong earthquakes in recent years. Moscow: Scientific world, 260 p. [in Russian]
- Pehlivan, M., Rathje, E.M., Gilbert, R.B., (2016). Factors influencing soil surface seismic hazard curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83, 180–190.
- Slepian, L.I. (1967). Deformation wave in a bar with damped masses. *Rigid Body Mechanics*, 5, 34–40. [in Russian]
- Yoshida, N., Iai, S., (1998). Nonlinear site response and its evaluation and prediction. *Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, 71–90.

Надійшла до редколегії 23.09.21

RESONANT PROPERTIES OF LAYERED SOIL MASSIF CONTAINING A LAYER WITH OSCILLATING INCLUSIONS

The paper is devoted to modeling of the seismic reaction of an inhomogeneous soil massif consisting of three layers that can incorporate oscillating inclusions.

The description of the behavior of soil strata is carried out on the basis of the continual approach, within which the dynamics of the medium is determined by a system of equations of motion and equations of state, where the elastic or visco-elastic properties of the medium are indicated. Classical linear models are quite simple and well verified experimentally, but due to the complex structure of natural geomedias, these models cannot always adequately describe wave processes in them. This requires improvement of models in such a way as to take into account the internal structure of materials.

In this paper, to describe the shear dynamics of an inhomogeneous soil massif, the equations of motion for a continuous medium in the form of mutually penetrating continua are used, one of which coincides with the Kelvin-Voigt carrier medium, and the other one is described by a set of noninteracting partial oscillators. Various inclusions, cracks, or cavities filled with gases and/or liquids can act as oscillators. The equations of motion are supplemented by the compatibility conditions at the boundaries of the layers. The set of layers is considered, among which only one contains oscillating inclusions. The one-dimensional boundary value problem with a free surface and the harmonic law of deformation of massif's rigid bedrock is solved. Using the exact solution of the boundary value problem, the amplification factor of strains for massifs with characteristics close to natural is calculated. Moreover, the iterative procedure, which makes it possible to write down the final formula for the amplification factor in the case of a layered medium with layers of more than 3 is developed. It is shown that the incorporation of inclusions in one of the layers leads to the appearance of an additional resonance frequency, a shift of resonances to the low-frequency region, the appearance of zones with significant damping of resonance peaks. The results obtained make it possible to improve the computational methods for determining the quantitative parameters of seismic hazard when work on seismic micro zoning of construction and operational sites in the seismic regions of Ukraine is carried out.

Keywords: *amplitude-frequency response, resonant properties of soils, heterogeneous media, methods of medium response modeling to seismic effects.*

А. Кендзера, канд. физ.-мат. наук, член-кор. НАН Украины,

ORCID: 0000-0003-0691-0227,

E-mail: skendzera@gmail.com;

С. Микуляк, д-р. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,

ORCID: 0000-0002-5246-0960,

E-mail: mykulyak@ukr.net;

Ю. Семенова, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,

ORCID: 0000-0003-4628-8663,

E-mail: ulaska@ukr.net;

И. Скуратовская, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

ORCID: 0000-0001-7129-4980,

E-mail: inna_skurativska@gmail.com;

С. Скуратовский, д-р. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,

ORCID: 0000-0003-4944-2646,

E-mail: skurserg@gmail.com;

Институт геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины,

пр. Ак. Палладина, 32, Киев, 03680, Украина

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА СЛОИСТОГО ГРУНТОВОГО МАССИВА, СОДЕРЖАЩЕГО СЛОЙ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Посвящено моделированию сейсмической реакции неоднородного грунтового массива, состоящего из трех слоев с возможными включениями.

Описание поведения грунтовых толщ осуществляется на основании континуального подхода, в рамках которого динамика среды определяется системой уравнений движения и уравнений состояния, где указываются упругие или упруго-вязкие свойства среды. Классические линейные модели являются достаточно простыми и хорошо верифицированными экспериментально, но из-за сложного строения реальных природных геосред эти модели не всегда могут адекватно описывать волновые процессы в них, что требует усовершенствования моделей в направлении учета внутренней структуры материалов.

Для описания сдвиговой динамики неоднородного грунтового массива используются уравнения движения сплошной среды в форме взаимно проникающих континуумов, один из которых описывается несущей средой Кельвина–Фойгта, а другой — совокупностью не взаимодействующих частных осцилляторов. В качестве осцилляторов могут выступать различные включения, трещины или полости, заполненные газами и/или жидкостями. Уравнения движения дополняются условиями совместимости на границах слоев. Рассматривается набор слоев, среди которых только один содержит осциллирующие включения. Решается одномерная краевая задача со свободной поверхностью и гармоническим законом деформирования подошвы массива. Используя точное решение краевой задачи, вычислен коэффициент усиления смещений для массивов с характеристиками, близкими к естественным, а также разработана итерационная процедура, позволяющая записать конечную формулу для коэффициента усиления в случае слоистой среды с количеством слоев свыше трех. Показано, что учет включений в одном из слоев приводит к появлению дополнительной резонансной частоты, сдвигу резонансов в низкочастотную область, возникновению зон с существенным ослаблением резонансных пиков. Полученные результаты позволяют усовершенствовать расчетные методы определения количественных параметров сейсмической опасности при проведении работ по сейсмическому микрорайонированию строительных и эксплуатационных площадок в сейсмических районах Украины.

Ключевые слова: *амплитудно-частотная характеристика грунтов, резонансные свойства грунтов, неоднородные среды, методы моделирования реакции среды на сейсмические воздействия.*

УДК 55(091); 55(092)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.04>

О. Іванік, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
О. Меньшов, д-р геол. наук, ст. дослідник,
E-mail: menshov.o@ukr.net
Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.,
К. Бондар, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,
К. Гадяцька, канд. геол. наук, інж.,
Л. Тустановська, канд. геол. наук, доц.,
Р. Хоменко, канд. геол. наук, асист.

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

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНКИ ЗСУВНОЇ НЕБЕЗПЕКИ В МЕЖАХ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ (НА ПРИКЛАДІ МОДЕЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ ЛИСА ГОРА, КИЇВ)

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

Розглянуто комплексування геолого-геофізичних та ГІС-методів для оцінки небезпечних геологічних процесів у межах урбанізованого середовища. Принциповим пробілом у вивченні геологічно небезпечних (зсуви, ерозія, забруднення і т. ін.) територій України є відсутність інформації про стан гірських порід та ґрунтів, а також їхньої взаємодії з минулими та сучасними природними та антропогенними утвореннями. Об'єктом дослідження є територія зсувної активізації Лисої гори, Україна, яка розташована в Голосіївському районі Києва. Незважаючи на умовну стабілізацію схилу, зсуви становлять реальну загрозу функціонуванню об'єктів інфраструктури, зокрема деформації залізниці вздовж Столичного шосе. Отримано результати дослідження зсувонебезпечних ділянок. Запропоновано ефективну методику, що включає геолого-геофізичну, термографічну зйомку та дистанційне зондування для моніторингу зсувних процесів та їх локального прогнозування. Результати вимірювання методом електротомографії на Лисій горі виявили дві локальні зони активізації зсувних зсувів, які розташовуються в діапазоні глибин 3–8 м від поверхні землі. Випадковий розподіл магнітної сприйнятливості ґрунту та частотна залежність магнітної сприйнятливості в межах ландшафтних перетинів та за вертикаллю у ґрунтових генетичних горизонтах підтверджують наявність зсувів, перерозподілів та нововідкладень ґрунту та підстильних порід. Це пов'язано з ерозійними і зсувними процесами.

Ключові слова: зсувна небезпека, стійкість схилів, геоморфологія, електротомографія, магнітна сприйнятливість, ґрунт.

Вступ. Проблема прогнозування зсувної небезпеки є пріоритетним напрямом досліджень у сфері оцінки ризиків та катастроф природного характеру, яка незалежно від вибору тих чи інших підходів щодо її розв'язання вимагає всебічного поглибленого аналізу геолого-геоморфологічних та гідрометеорологічних чинників формування зсувів, а також синтезу наукових та фондових матеріалів для повного розуміння досліджуваної проблеми. Світовий досвід у сфері дослідження гравітаційних процесів показав значну ефективність застосування комплексного синергетичного підходу для моделювання при попередженні і прогнозуванні негативного впливу зсувних процесів (Foster et al., 2012; Garsia Rodriguez et al., 2008). Методи моделювання та ГІС активно застосовуються для отримання оцінки ймовірного розвитку зсувів, створення моделей багатофакторної просторової оцінки та прогнозного картування.

В основі регіонального прогнозування лежить спеціальне районування території, яке може охарактеризувати характер поширення зсувів та умови їх формування. Локальне прогнозування передбачає проведення польових робіт із залученням комплексу геолого-геофізичних та дистанційних методів, моніторинг розвитку зсувного процесу та аналіз напружено-деформованого стану схилу. Особливо важливим це є для урбанізованих територій, у межах яких використовуються спеціальні моніторингові дослідження.

Крім того, відповідно до завдань програми "Горизонт Європа" на локальному рівні важливим є застосування сучасних ефективних, швидкісних та дешевих технологій. Таким критерієм повністю відповідають магнітні методи дослідження ґрунтового покриву, які пов'язують розвиток ерозійних схиливих процесів із небезпекою подальшого виникнення зсувів.

Стан проблеми та постановка завдання. В основі регіонального прогнозування лежить спеціальне районування

території, яке може охарактеризувати специфіку поширення зсувів та умови їх формування. ґрунтуються такі прогнози на застосуванні як детермінованих, так і стохастичних методик, що мають високу достовірність отриманих результатів та можуть бути як якісними, так і кількісними. Якісний прогноз зсувонебезпеки включає методи, які ґрунтуються на експертних оцінках, та методи оцінки стійкості території в балах (Кузьменко та ін., 2009). Кількісний прогноз ґрунтується на стохастичному та детермінованому підходах (Pelletier, 2008). Методи детермінованого моделювання включають групу методів аналогій та методів оцінки прояву зсувних процесів. У такому випадку ГІС виступає не лише середовищем для введення, збереження даних та їх візуалізації, а й для проведення спеціальних розрахунків. До статистичних методів прогнозу зсувонебезпеки належать методи геодинімічного потенціалу, багатовимірної статистики та регресійного аналізу (Іванік, 2014).

Локальне прогнозування зсувів передбачає польові роботи, моніторинг і чисельне моделювання зсувних процесів із залученням комплексу геофізичних методів. Ці методи та спеціальні польові дослідження визначають склад і структуру найбільш небезпечних зсувів. Із цією метою також проводяться спеціальні аналітичні лабораторні дослідження з оцінкою фізичних параметрів гірських порід у межах зсувонебезпечних схилів, які використовуються під час оцінки стійкості схилу і розрахунків напружено-деформованого стану породних комплексів у зонах зсувної небезпеки на засадах теорії лінійної пружності (Іванік та ін., 2019).

В останні роки застосування геофізичних методів для локального прогнозування зсувів стало звичною практикою. Оглядова робота (Наск, 2000) аналізує фізичні основи застосування геофізичних методів при вивченні стабільності схилу. Автори (Whiteley et al., 2019) подають узагальнення досвіду щодо методологічних аспектів і

© Іванік О., Меньшов О., Кравченко Д., Бондар К., Гадяцька К., Тустановська Л., Хоменко Р., 2022

наголошують на впровадженні комплексних багатопараметричних і багатовимірних досліджень. Геофізичні методи є основою моніторингу зсувної небезпеки у забудованих і щільно заселених регіонах. Розвиток технології БЛА (Walter et al., 2009) та використання інших можливостей дистанційного зондування (Kirschbaum et al., 2015) збільшили часову і просторову розрізненість методів контролю деформацій поверхні і надали необхідне апіорне підґрунтя для постановки геофізичних досліджень. Переважна більшість їх виконується геоелектричними методами, а саме методами опору заземлень, а також самочинної поляризації (Hen-Jones et al., 2017).

В Україні геоелектричні дослідження зсувів проводяться давно (Vyzhva et al., 2020), настав час впровадження сучасних методів геофізичного моніторингу у цьому важливому сегменті природно-техногенної безпеки населення, а саме методу томографії електричного опору.

Розглядаючи ерозійні процеси ґрунтового покриву у контексті зсувної небезпеки територій, проаналізуємо сучасний стан магнітних досліджень у цій області. Відзначається (Ding et al., 2020), що багато районів зазнають впливу як вітрової, так і водної ерозії, що призводить до серйозної деградації земель. Магнітна сприйнятливість є ефективним інструментом для кількісного визначення перерозподілу ґрунтів як ознаки зсувної небезпеки. Існуючі методи вимірювання ерозії, як правило, включають закладання ґрунтових розрізів, 3D-лазерне сканування, моніторингові ерозієзнавчі спостереження та розробку привентивних заходів. На практиці такі процедури мають деякі обмеження. Результати дослідних робіт (Barbosa et al., 2019) мали на меті оцінку ефективності вимірювання магнітної сприйнятливості як індикатора факторів еродованості ґрунтів (для моделей USLE та WEPP) на прикладі оксизолів з різним вмістом заліза на північному сході штату Сан-Паулу, Бразилія. Ерозія, перерозподіл ґрунтів та накопичення відіграють важливу геоморфологічну та екологічну роль. Водну ерозію ґрунтового покриву, що спостерігається найбільш гостро у межах схилів, можна вважати частиною зсувних процесів верхньої частини геологічного розрізу. Під час ерозійних процесів відслонюються глибші ґрунтові генетичні горизонти, які можна ідентифікувати при вимірюванні набору магнітних параметрів, наприклад, найбільш експресного та дешевого для визначення параметра магнітної сприйнятливості. У той же час відзначається, що за допомогою зонування еродованих ділянок на основі вимірювання магнітної сприйнятливості можна робити прогностичні висновки про розвиток ерозії, що виникає у процесі обробки земель (Jordanova et al., 2016). Для виявлення ерозії ґрунтів слід вивчати вертикальні розподіли магнітних параметрів у ґрунтах з метою ідентифікації процесів змиву на поверхні (Kapicka et al., 2013). Крім того, магнітний метод успішно застосовується для ефективного та експресного визначення ерозії ґрунтів без залучення фізико-хімічних вартісних досліджень. Також магнітні методи застосовуються для моніторингу перерозподілу ґрунтів. Низка сучасних досліджень безпосередньо і нерозривно розглядає потенціал магнітних методів для одночасного виявлення ерозійних та зсувних процесів. У дослідженні (Eso et al., 2019) вивчали, як змінюються магнітні властивості та хімічний елементний склад у ґрунтового профілі на ділянці зсуву. У межах територій з інтенсивними кліматичними змінами для розробки превентивних заходів необхідна інформація про ерозію ґрунтів під час потужних опадів. Нові дані стосовно магнітних вишукувань у контексті вивчення ґрунтового покриву урбанізованих та ерозієнебезпечних

територій України наведені в роботах (Меньшов, 2016; Меньшов, 2018).

Матеріали і методи. В основі алгоритму щодо оцінки зсувонебезпеки лежить поетапне вивчення зсувних об'єктів із застосуванням комплексу методів. Однією з небезпечних ділянок активізації зсувів у межах м. Київ є Лиса гора (рис. 1), розташована в Голосіївському районі. В кінці 80-х років минулого століття Лиса гора набула статусу природного парку, а залишки Лисогірської оборонної фортеці на її схилах є пам'яткою архітектури та об'єктом підвищеної уваги жителів та гостей столиці. Наразі досліджені зсувні схили в межах Лисої гори вважаються умовно стабілізованими завдяки виконанню протизсувних заходів у 2014 та 2016 роках. Необхідність дослідження обраної ділянки полягає в тому, що попри умовну стабілізацію схилу, зсуви становлять реальну загрозу функціонуванню інфраструктурних об'єктів, зокрема деформації залізничного полотна вздовж Столичного шосе. Зсув у межах Лисої гори (абсолютні відмітки – 156,6 м) є прикладом формування консеквентних зсувів, які розвиваються по строкатих глинах (N1-2sg) нижнього пліоцену та мають переважно циркуподібну форму. У складі горизонту строкатих глин (N1-2sg) нижнього пліоцену виділяється чотири товщі (дві верхні – темнішого забарвлення з домішками дисперсної вуглистої речовини, у складі яких переважає каолінит, та дві нижні – світлішого забарвлення, у складі яких окрім каоліниту зустрічається також монтморилоніт. У межах відслонення щільні та пластичні строкаті глини підлягають процесам вивітрювання (розтріскуванню та осипанню), а у зволоженому стані вони опливають, що значно порушує стійкість схилу. "Строкатість" виникає за рахунок присутності вохристо-жовтих, червонувато-жовтих плям. Неглибока глибина залягання строкатих глин у межах схилу є однією з причин активізації зсувних процесів. Наявність тріщин і заколів у верхній частині схилу свідчить про можливість потенційної активізації зсувних процесів. Стінка відриву зсуву продовжує осипатись, змінюючи свою геометрію. Порушення режиму горизонтальної міграції вологи в лесоподібних суглинках створює умови для утворення верховодки та погіршує їх несучу властивість, що в межах цієї ділянки тягне за собою порушення їхньої стійкості, виникнення серії тріщин відриву, і в кінцевому результаті призводить до гравітаційних зміцень.

ЕлектрOMETРИЧНІ дослідження геоелектричного розрізу здійснено методом томографії електричного опору (ТЕО). Вимірювання виконано за допомогою багатоелектродного обладнання. Обладнання має такі характеристики: вимірювання здійснюються на постійному струмі; кількість електродів – 64; крок розташування електродів – 1 м; кількість вимірювальних каналів – 1. Для визначення позірного опору використано модифікацію Веннера–Шлюмберже симетричної чотириелектродної установки. Враховуючи малу глибинність досліджень та використання багатокаскадного фільтрувального вхідного тракту запису, електричні вимірювання здійснювалися за низької напруги живлення близько 40–50 В. Значення струмів у лінії АВ при цьому перебувало в межах 4–50 мА. Обробку даних виконано в програмі RES2dinv, яка дозволяє реалізувати блочні схеми розв'язання оберненої задачі в класі 2D моделей (Loke, 2009). Для інверсії експериментальних даних вибрано алгоритм Оссам–Марквардт, який здійснює комбіновану гладко-контрастну схему інверсії, що базується на використанні Гаус–Ньютонавського методу найменших квадратів: Оссам – інверсія з використанням оператора згладжування і додатковою мінімізацією контрастності,

яка дозволяє отримати гладкий розподіл параметра (питомого опору ρ); Marquardt – алгоритм інверсії, який забезпечує отримання контрастної моделі розподілу параметра середовища. Використання гладко-контрастної схеми інверсії даних ТЕО дозволяє блоки простору з

близькими значеннями питомого опору об'єднати в один, тим самим реалізовувати також пошарову інтерпретацію результатів зондування з відповідною виразною візуалізацією розрізу.



Рис. 1. Модельний зсувний об'єкт Лиса гора, м. Київ, знімок виконаний за допомогою БПЛА (50°23'46"Пн. ш. 30°33'24"Сх. д)

Для дослідження зсувної небезпеки на локальному рівні застосовується також дистанційний метод інфрачервоної термографії (IRT), що дозволяє виявляти структурні порушення, зони підвищеної обводненості зсувних схилів, склад та структуру найнебезпечніших зсувів. Досвід зарубіжних вчених показав, що теплові аномалії при дослідженні зсувів указують на наявність таких критичних факторів: (i) структурні порушення (за рахунок ефекту охолодження/нагрівання повітря, що циркулює в межах відкритих порушень; різної теплопередачі зсувного матеріалу щодо поверхні схилів); (ii) вологість або зони просочення (через поверхневе охолодження, викликане випаровуванням води) (Frodella et al., 2014). Інфрачервона термографія проводилась за допомогою інфрачервоної (ІЧ) термокаліброваної камери, датчики якої виявляють теплове випромінювання, в результаті чого отримується цифрове зображення ("термограма"). Виконання термографічних досліджень проводилось за допомогою інфрачервоної камери Optiris® PI640 з об'єктивом 33°.

Для дослідження зв'язків між розвитком схилової водної ерозії ґрунтового покриву та подальшим формуванням зсувів було застосовано методику магнітних досліджень. Територія дослідження розташована в Лісо-степовій зоні України. Ландшафт включає локальні катени, які демонструють значні зміни у висоті, включаючи багато пагорбів (плато) та понижені ділянки (локальні балки). Тип ґрунту залежить від особливостей ландшафту та геоморфології місцевості. До геоморфологічних особливостей території належать осипи, зсуви, яри, ерозія ґрунтів. Сірі лісові ґрунти визначені як переважний тип ґрунтів у лісовому ландшафті досліджуваної території. Сірі лісові ґрунти України загалом характеризуються середніми значеннями магнітної сприйнятливості (Меньшов та ін., 2016). Комплекс магнітних досліджень включав польовий та лабораторний етапи вимірювання та аналізів. У польових умовах було проведено рекогносцирувальні роботи, на основі візуального обстеження визначено найефективніші ділянки для проведення вимірювань та відбору зразків ґрунтів. При цьому бралися до уваги наявні зсувні процеси, техногенне забруднення

ґрунтів, можливість відслідковування магнітних параметрів уздовж ґрунтознавчих катен та за вертикаллю (у генетичних горизонтах), процеси водної ерозії. У польових умовах вимірювалася об'ємна магнітна сприйнятливості k (10^{-3} од. СІ) за допомогою польового капаметру ПИМВ-М. За системою конверт у цих же точках проводився відбір зразків ґрунтів. Було закладено ґрунтознавчі розрізи для дослідження перерозподілу природного залягання генетичних горизонтів ґрунтів в умовах зсувних процесів. У лабораторії вимірювалася та розраховувалася питома магнітна сприйнятливості χ (10^{-8} м³/кг) за допомогою капамістка KLY-2. Для розрахунку частотної залежності магнітної сприйнятливості χ_{FD} (%) було виміряно низькочастотну χ_{lf} та високочастотну χ_{hf} магнітні сприйнятливості за допомогою двочастотного магнітометра MS2B. Зауважимо, що під час запланованого наступного етапу досліджень передбачаються магнітомінералогічні вимірювання, які включатимуть термомагнітний аналіз, вимірювання параметрів петлі гістерезису, визначення ізотермічної та безгістерезисної (ідеальної) намагніченостей.

Результати та їх обговорення. На основі функції Weighted Overlay (Spatial Analyst) створено інтегральну карту ймовірності виникнення зсувів Київського Придніпров'я (рис. 2). Було встановлено, що більша частина зсувів приурочена до головних розломів у межах м. Київ (Київський, Святошинський, Деснянський). За допомогою просторового аналізу (Spatial Join (Analyst)) зафіксовано приуроченість зсувів до елювіальних та еолово-делювіальних відкладів лесової формації, схилів південної експозиції, крутизна яких коливається від 10 до 25°, а також розломних зон.

Щодо стратиграфічної приуроченості, то більшість зсувів простежується у відкладах верхнього неоплейстоцену. Для побудови буферних зон навколо розломів використано функцію буферного аналізу. Multiple Ring Buffer (Analysis). За процедурою рекласифікації Reclassify (Spatial Analyst) та розробки відповідної єдиної шкали створено растрові моделі для оцінки вищезазначених факторів на формування зсувів.

Проведено ранжування території за ступенем імовірності виникнення зсувної небезпеки від мінімальної, низької, середньої до високої за процедурою Reclassify (Spatial Analyst). Отже, на основі просторового моделювання проведено комплексний аналіз чинників формування зсувних процесів.

Визначення напружено-деформованого стану (НДС) зсувонебезпечного схилу та обрахунки стійкості схилу в межах Лисої гори базувались на методі граничної рівноваги Моргенштерна–Прайса, який було реалізовано в програмному продукті Slope/W (GeoStudio2020). Визначено, що схил наближається до стану граничної рівноваги ($K_{st}=1,154$). Дані літологічні різновиди (строкаті глини), які є основним деформуючим горизонтом для утворення зсувів у межах цієї ділянки, мають тверду та напівтверду консистенцію, слабостискувані, високопластичні, слабонабухаючі, з низьким опором до зсувних навантажень (0,01 КПа) та значними величинами модуля загальної деформації (40 КПа). Їх склад та властивості зумовлені розвитком ослаблених зон, що підтверджені за допомогою методів інфрачервоної термографії та ТЕО.

Також було отримано дані щодо термічних досліджень, термограми досліджуваної ділянки. Фіксуються "гарячі" теплові аномалії, що приурочені до лінії відриву зсувного тіла. Низькотемпературні аномалії вказують на зміщені лесоподібні суглинки.

Розглянемо коротко результати геофізичних досліджень. Спираючись на результати геоелектричних досліджень, можна стверджувати, що відповідний геологічний розріз має тришарову будову, а також структурні особливості, які можна вважати ознаками зсувного процесу. У нижній частині геоелектричного розрізу

виділяється відносно високоомний (>270 Ом) шар 3, верхня межа якого понижується в напрямку з півночі на південь. Вище, в інтервалі глибин 8,5–3,8 м залягає геологічне тіло, опір якого становить 200–240 Ом. У цій товщі виділяються дві області низьких опорів (60–120 Ом), де можна передбачати зони активізації зсувного процесу внаслідок перезволоження відкладів. Вертикальна потужність кожної із зон не перевищує 5 м. Весь розріз перекривається шаром горизонтального залягання (шар 1 на рис. 5б) з опором 210–800 Ом і максимальною потужністю 4,7 м.

Для розуміння загального розподілу та тенденцій змін магнітної сприйнятливості та її частотної залежності для всіх зразків ґрунту було побудовано гістограми (рис. 3). Розподіл обох параметрів (тобто магнітної сприйнятливості χ та частотної залежності магнітної сприйнятливості χ_{fd}) є нормальним. Права асиметрія розподілу значень χ (рис. 3а) складається з найбільш магнітних проб, відібраних переважно у верхній частині розрізу, а також на схилі 45° ($\chi=60-80 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Всі вони належать до горизонту А (верхній шар ґрунту). Ліву асиметрію розподілу χ формують переважно проби з горизонту В і С ґрунтового профілю ($\chi=10-40 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) та ґрунту з перехідних зон між місцевими плато та крутими схилами ($\chi=30-40 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Більшість значень лежить у діапазоні $40-60 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, які належать до зразків з низовини та верхніх шарів ґрунту. Розподіл значень частотної залежності магнітної сприйнятливості представлено на рис. 2б. Розподіл нормальний. Відношення значень χ_{fd} до ландшафтного положення або генетичного горизонту ґрунту ускладнене через перерозподіл ґрунту відповідно до ерозії та початкових локальних зсувів, а також через ознаки антропогенного забруднення.

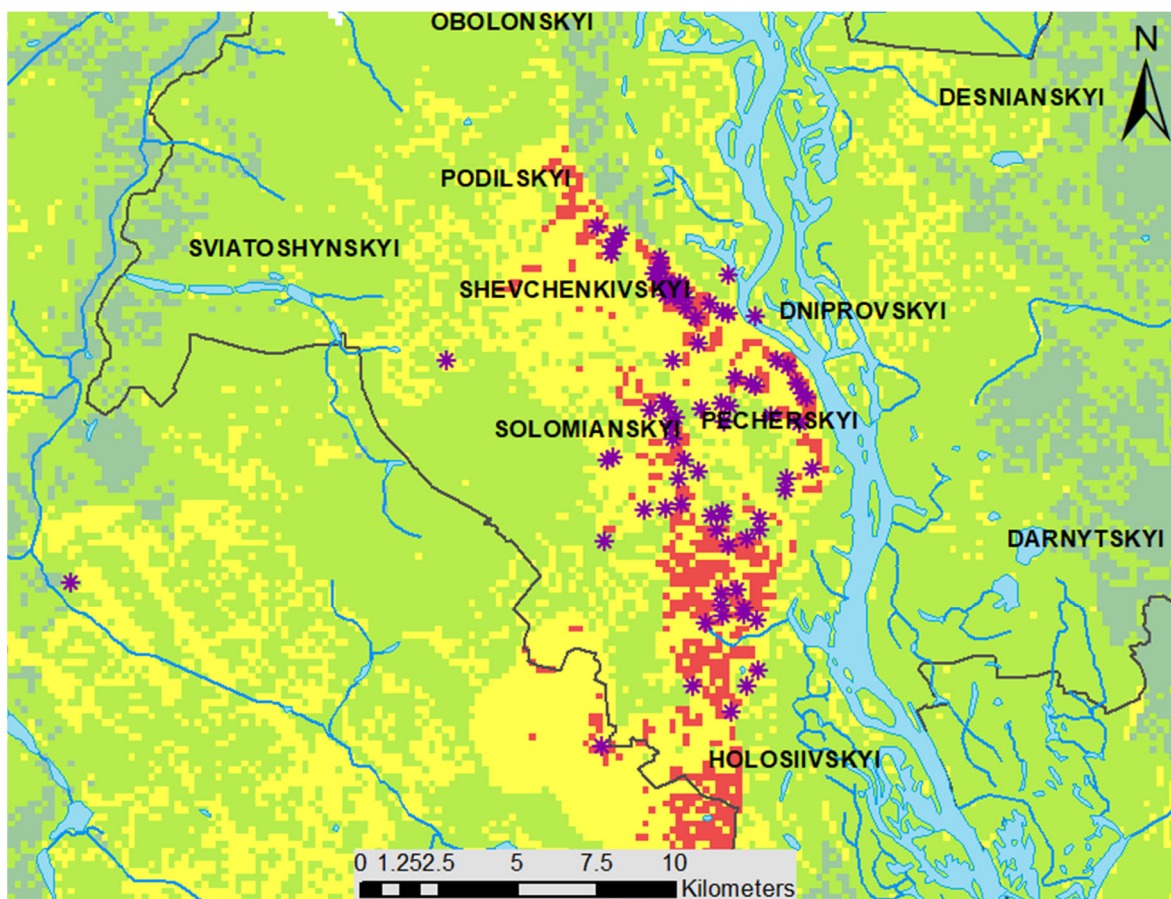


Рис. 2. Карта зсувної сприйнятливості

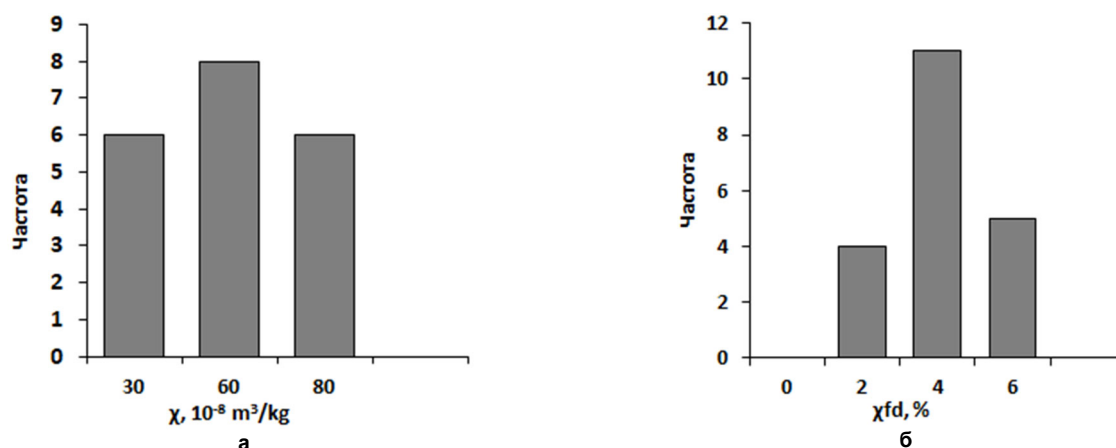


Рис. 3. Результати визначення низькочастотної магнітної сприйнятливості та її частотної залежності для всіх зразків ґрунту зсувонебезпечного об'єкта Лиса гора: а – гістограма розподілу χ ; б – гістограма розподілу χ_{fd} .

Права асиметрія включає зразки з $\chi_{fd}=5-6$ %, що означає педогенез магнітних мінералів (природне походження у процесі ґрунтоутворення) з домішками суперпарамагнітних зерен (SP), а також більш грубих стабільних однодомених (SD) і багатодомених (MD) частинок. Ліву асиметрію складають зразки зі значеннями χ_{fd} менше 2 %, що означає антропогенний генезис магнітних мінералів та переважання мультидомених зерен MD (зерна SP наявні з ймовірністю <10 %). Статистично найбільш імовірні значення χ_{fd} потрапляють в діапазон 3–4 %. Ці значення є характерними для зони переходу від антропогенного до педогенного характеру ґрунтового магнетизму. Цей перехід був визначений різними дослідниками саме при значеннях 3 або 4 % (Wang et al., 2020; Evans and Heller, 2003).

Отже, результати рекогносцирувальних досліджень території Лиса гора показують, що магнітні методи є експресними, ефективними та низьковартісними при оцінці природних та природно-техногенних процесів, пов'язаних з ерозією ґрунтового покриву та зсувною активністю за умови комплексування з іншими геологічними, геофізичними, ґрунтознавчими методиками та ГІС. На наступному етапі запланований більш глибокий магнітомінералогічний аналіз результатів щодо об'єкта Лиса гора.

Інтегрований аналіз, комплексна оцінка та інтерпретація різномірної інформації для прогнозу поширення зсувних процесів інструментально забезпечується застосуванням ГІС-технологій з їх потужними обчислювальними ресурсами та інформаційною методологією. Однак специфічні ландшафтно-кліматичні та геолого-геоморфологічні умови формування зсувних процесів диктують особливі підходи і методи просторово-часового їх прогнозування на локальному та регіональному рівнях із обов'язковим залученням даних польових спостережень та використанням потужного інструментарію ГІС. Головним завданням є створення прогнозно-еталонної моделі відповідних геологічних об'єктів (зокрема, зсувів), що являє собою класифікатор ознак (чинників) виникнення несприятливих геологічних явищ. Інформативність цих чинників визначається через кількісні характеристики ступеня впливу кожного з них на формування зсувів. Інтегральні дані зсувонебезпеки дають можливість одночасного врахування розглянутих факторів, отримання принципово нової просторової інформації та відповідної реалізації комплексної моделі зсувонебезпеки району. Такі підходи використовуються для створення карт імовірності зсувної небезпеки для різних

регіонів (Zhou et al., 2021; Biswakarma et al., 2019). Отримані результати стосуються загального впливу геолого-геоморфологічних та ландшафтно-кліматичних факторів на формування зсувних явищ. Однак проведення генетичного аналізу зсувів, вивчення їх динаміки та режиму можливе тільки при детальних дослідженнях, визначенні пріоритетності впливу кожного з факторів на процес зсувоутворення. Саме такі роботи становлять основу локального прогнозування зсувної небезпеки. На основі локальних прогнозів досліджуються певні типи схлизових процесів, визначається їх локалізація та взаємодія з конкретними інженерними спорудами. Вони глибше оцінюють природу зсувного процесу, мають найбільше практичне значення і, як правило, здійснюються комплексом методів. Серед них одними з найдієвіших є геофізичні методи, які дозволяють розв'язати проблему визначення поверхні ковзання та зон підвищеної зволоженості ґрунтів.

Відповідно, при виборі геофізичного методу їх досліджень слід у першу чергу звернути увагу на методи неінвазивного визначення фізичних показників, які тісно пов'язані із зволоженістю порід, а саме – електричні методи. Для того щоб геофізичне знімання ефективно розв'язувало проблему моніторингу зсувного процесу, необхідно, щоб фізична властивість середовища – тригер зсувного процесу (як наприклад, вміст води) мала функціональний зв'язок з геофізичним параметром, що визначається. У свою чергу, варіації цього параметра по геологічному розрізу мають однозначно відображати літологічні зміни або коливання фізичного стану літологічно однорідної товщі (Whiteley et al., 2019). Зона подальшої активізації зсуву виділяється завдяки своєму пониженому електричному опору внаслідок постійного зволоження відкладів, які його складають. Надмірне зволоження може бути наслідком руйнування текстури в процесі руху вниз по схилу, що полегшує проникнення води атмосферних опадів до порід тіла зсуву.

Висновки. Основним результатом дослідження є впровадження методології регіонального та місцевого масштабу прогнозування зсувної небезпеки з метою оцінки ризику та розробки адекватних профілактичних заходів. Моделювання та прогнозування зсувних небезпек у регіональному та місцевому масштабах має негайний практичний результат, оскільки є основою для безпечного та ефективного функціонування інфраструктурних об'єктів, зниження соціально-економічних, фінансових та ресурсних ризиків, а також розробки відповідних

заходів запобігання та стратегії пом'якшення наслідків без залучення дорогих традиційних спеціалізованих досліджень. Запропоновано базу даних інвентаризації зсувів Київської області та визначено основні причини утворення зсувів у цьому регіоні. Підготовлено карти зсувної сприйнятливості регіонів. Запропоновано ефективну методику, що включає геологічну, геофізичну, термографічну зйомку та дистанційне зондування для моніторингу зсувних процесів та їх локального прогнозування для модельних майданчиків Київської області. Набір комплексних методів надав корисну інформацію як щодо реконструкції геометрії зсуву, так і щодо гідрологічної характеристики ділянки Лиса гора.

Геофізичні методи незамінні на локальному рівні прогнозування зсувної небезпеки. На Лисій горі за допомогою застосування комплексу методів виявлено дві локальні зони активізації зсувних зміщень, які лежать у діапазоні глибин 3–8 м.

Визначено високу інформативність магнітних методів при дослідженні зсувонебезпечних та ерозійних процесів. Як тестовий полігон використано дослідну ділянку Лиса гора. За результатами вимірювання магнітної сприйнятливості ґрунтів та її частотної залежності зафіксовано перерозподіл природного залягання ґрунтових генетичних горизонтів, що є ознакою розвитку зсувної та ерозійної активності.

Підтвердження. Роботу виконано у рамках держбюджетної теми № 21БП049-02 "Прогнозування зсувної небезпеки регіонального та локального рівня та оцінка впливу на суспільство".

Список використаних джерел

- Кузьменко Е. Д., Безсмертний А. Ф., Вдовина О.П., Крив'юк І.В., Чебан В.Д., Штогрин Л. В. Дослідження зсувних процесів геофізичними методами: монографія. За ред. Е. Д. Кузьменка. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 294 с.
- Іванік О. Методичне забезпечення прогнозування зсувної небезпеки на регіональному та локальному рівні: принципи, методи, моделі. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. 2014. № 3. С. 55-60.
- Іванік О., Шевчук В., Кравченко Д., Гадяцька К. Національна база даних зсувних процесів: принципи розробки, упровадження та застосування для оцінки зсувної небезпеки регіонального та локального рівня. Вісник КНУ. Геологія. 3(86). 2019. С.70–74. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.10>
- Меньшов, О., Кудеравець, Р., Попов, С., Хоменко, Р., Сухорада, А., Чоботок, І. (2016). Термомагнітний 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. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 80(1), 40-45.
- Barbosa, R.S., Júnior, J.M., Barrón, V., Martins Filho, M.V., Siqueira, D.S., Peluco, R.G., ... Silva, L.S. (2019). Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. *Environmental earth sciences*, 78(1), 12.
- Biswakarma P, Barman BK, Joshi V, Rao KS (2020) Landslide susceptibility mapping in east Sikkim region of Sikkim Himalaya using high resolution remote sensing data and GIS techniques. *Appl. Ecol. Environ. Sci.* 8(4):143-153. DOI:10.12691/aees-8-4-1
- Eso R., Bijaksana S, Ngkoimani LO, Agustine E, Tamuntuan G, Tufaila M, ... & Usman I (2019) Patterns of variation magnetic properties and chemical elements of soil profile in landslide area of South East Sulawesi Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing 311(1):012008.
- Evans ME, Heller F (2003) *Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetics*. San Diego: Academic Press.
- Foster C, Pennington CVL, Culshaw MG, Lawrie K (2012) The national landslide database of Great Britain: development, evolution and applications. *Environmental Earth Sciences* 66(3): 941-953. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1304-5>
- Frodella W, Morelli S, Gigli G, Casagli N (2014) Contribution of infrared thermography to the slope instability characterization. *World Landslide Forum* 3. 2-6 June 2014, Beijing, China.

- Garsia-Rodriguez MJ., Malpica JA., Benito B, Diaz M (2008) Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology* 95:172-191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.001>
- Hack R (2000) Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics* 21(4):423-448. <https://doi.org/10.1023/A:1006797126800>
- Hen-Jones RM, Hughes PN, Stirling RA, Glendinning S, Chambers JE, Gunn DA, Cui YJ (2017) Seasonal effects on geophysical-geotechnical relationships and their implications for electrical resistivity tomography monitoring of slopes. *Acta Geotechnica* 12(5):1159-1173. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0523-7>
- Ivanik O., Shabaturova O., Homenko R, Hadiatska K, Kravchenko D (2020) Local forecast of landslide hazards: Case study from Kyiv region. In *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo118>
- Jordanova N (2016) Soil magnetism: Applications in pedology, environmental science and agriculture. Academic press.
- Kapicka, A., Dlouha, S., Grison, H., Jaksik, O., Petrovsky, E., Kodesova, R. (2013). Magnetic properties of soils - A basis for erosion study at agricultural land in Southern Moravia. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, 577.
- Kirschbaum D, Stanley T, Zhou Y (2015) Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology* 249:4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Loke MH (2009) Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys
- Pelletier J., Quantitative modelling of Earth processes. Cambridge, 2008. 295 p.
- Vyzhva S, Onyshchuk V, Onyshchuk I, Reva M, Shabaturova O (2020) Geophysical researches of the landslide territories of the right bank of the Dnieper river (forest-steppe zone). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology* 3(90):36-43. (In Ukrainian). <http://doi.org/10.17721/1728-2713.90.05>
- Walter M, Niethammer U, Rothmund S, Joswig M (2009) Joint analysis of the Super-Sauze (French Alps) mudslide by nanoseismic monitoring and UAV-based remote sensing. *First break* 27(8). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.27.1302.32182>
- Wang L, Liu D, Lu H (2000) Magnetic susceptibility properties of polluted soils. *Chinese Science Bulletin* (45):1723-1726. <https://doi.org/10.1007/BF02898995>
- Whiteley JS, Chambers JE, Uhlemann S, Wilkinson PB, Kendall JM (2019) Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: a review. *Reviews of Geophysics* 57(1):106-145. <https://doi.org/10.1029/2018RG000603>
- Zhou X, Wen H, Zhang Y, Xu J, Zhang W (2021) Landslide susceptibility mapping using hybrid random forest with GeoDetector and RFE for factor optimization. *Geoscience Frontiers* 12(5):101211. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101211>

References

- Barbosa, R.S., Júnior, J.M., Barrón, V., Martins Filho, M.V., Siqueira, D.S., Peluco, R.G., ... Silva, L.S. (2019). Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. *Environmental earth sciences*, 78(1), 12.
- Biswakarma P, Barman BK, Joshi V, Rao KS (2020) Landslide susceptibility mapping in east Sikkim region of Sikkim Himalaya using high resolution remote sensing data and GIS techniques. *Appl. Ecol. Environ. Sci.* 8(4):143-153. DOI:10.12691/aees-8-4-1
- Eso R., Bijaksana S, Ngkoimani LO, Agustine E, Tamuntuan G, Tufaila M, ... & Usman I (2019) Patterns of variation magnetic properties and chemical elements of soil profile in landslide area of South East Sulawesi Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing 311(1):012008.
- Evans ME, Heller F (2003) *Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetics*. San Diego: Academic Press.
- Foster C, Pennington CVL, Culshaw MG, Lawrie K (2012) The national landslide database of Great Britain: development, evolution and applications. *Environmental Earth Sciences* 66(3): 941-953. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1304-5>
- Frodella W, Morelli S, Gigli G, Casagli N (2014) Contribution of infrared thermography to the slope instability characterization. *World Landslide Forum* 3. 2-6 June 2014, Beijing, China.
- Garsia-Rodriguez MJ., Malpica JA., Benito B, Diaz M (2008) Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology* 95:172-191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.001>
- Hack R (2000) Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics* 21(4):423-448. <https://doi.org/10.1023/A:1006797126800>
- Hen-Jones RM, Hughes PN, Stirling RA, Glendinning S, Chambers JE, Gunn DA, Cui YJ (2017) Seasonal effects on geophysical-geotechnical relationships and their implications for electrical resistivity tomography monitoring of slopes. *Acta Geotechnica* 12(5):1159-1173. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0523-7>
- Ivanik, O. (2014). Methodology of predicting landslide hazards on a regional and local scale: principles and models. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 66(3), 55-60.
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Hadiatska, K. (2019). National database of landslide processes: principles of development, implementation

and application for landslide hazard assessment on regional and local levels. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 3(86), 70-74. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.10>

Ivanik O., Shabatura O., Homenko R., Hadiatska K., Kravchenko D (2020) Local forecast of landslide hazards: Case study from Kyiv region. In Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo118>

Jordanova N (2016) Soil magnetism: Applications in pedology, environmental science and agriculture. Academic press.

Kapicka A., Dlouha S., Grison H., Jaksik O., Petrovsky E., Kodesova R. (2013). Magnetic properties of soils - A basis for erosion study at agricultural land in Southern Moravia. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management, 577.

Kirschbaum D, Stanley T, Zhou Y (2015) Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. Geomorphology 249:4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>

Kuzmenko, E.D., Bezsmertny A.F., Vdovina, O.P., Kryvyuk, I.V., Cheban, V.D., Shtogrin, L.V. (2009). Research of landslide processes by geophysical methods. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 294.

Loke MH (2009) Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys

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.

Menshov, O. I. (2016). Magnetic method applying for the control of productive land degradation. Geofizicheskiy Zhurnal, 38(4), 130-137.

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.

Pelletier J., Quantitative modelling of Earth processes. Cambridge, 2008. 295 p.

Vyzhva S, Onyshchuk V, Onyshchuk I, Reva M, Shabatura O (2020) Geophysical researches of the landslide territories of the right bank of the Dnieper river (forest-steppe zone). Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology 3(90):36-43 (In Ukrainian). <http://doi.org/10.17721/1728-2713.90.05>

Walter M, Niethammer U, Rothmund S, Joswig M (2009) Joint analysis of the Super-Sauze (French Alps) mudslide by nanoseismic monitoring and UAV-based remote sensing. First break 27(8). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.27.1302.32182>

Wang L, Liu D, Lu H (2000) Magnetic susceptibility properties of polluted soils. Chinese Science Bulletin (45):1723-1726. <https://doi.org/10.1007/BF02898995>

Whiteley JS, Chambers JE, Uhlemann S, Wilkinson PB, Kendall JM (2019) Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: a review. Reviews of Geophysics 57(1):106-145. <https://doi.org/10.1029/2018RG000603>

Zhou X, Wen H, Zhang Y, Xu J, Zhang W (2021) Landslide susceptibility mapping using hybrid random forest with GeoDetector and RFE for factor optimization. Geoscience Frontiers 12(5):101211. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101211>

Надійшла до редколегії 19.11.21

O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,

E-mail: om.ivanik@gmail.com;

O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,

E-mail: menshov.o@ukr.net

D. Kravchenko, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,

K. Bondar, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,

K. Hadiatska, PhD (Geol.), Engineer,

L. Tustanovska, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,

R. Khomenko, PhD (Geol.), Assist.

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

METHODOLOGICAL ASPECTS OF LANDSLIDE RISK ASSESSMENT WITHIN URBAN AREAS (CASE STUDY OF THE MODEL SITE "LYSA GORA", KYIV)

The integrated geological, geophysical, and GIS methods for the overall assessment of the geological hazards within the urbanized environment were considered. The principal gap in the understanding of the geologically hazardous areas in Ukraine (landslide, soil erosion, pollution, etc.) is the lack of information about the properties of rocks and soils as well as their interaction with the past and present natural and anthropogenic formation. The study area is the landslide activation territory of Lysa Gora in Kyiv, Ukraine (Golosiivsky district). The slope has the conditional stabilization. At the same time the landslides provide the real danger to the infrastructure facilities. One of the examples is the deformation of the railway along the Stolychne Highway. Landslide susceptibility data have been collected. The proposed methodology consists of the geological, geophysical, thermography, and remote sensing. This methods provide the possibility for the monitoring of landslides at the model areas in Kyiv region. The electrical resistivity tomography at the Lysa Gora identified two local zones of activation of landslide displacements, which are located in the range of depths of 3-8 m from the ground surface. The random distribution of the soil magnetic susceptibility and frequency dependence of the magnetic susceptibility both on lateral and vertical line (soil genetic horizons) identified the presence of the displacement, redistribution and deposition of the soil and underlying rocks. All the mentioned factors are in the genetic relation to the soil erosion and initial landslides.

Keywords: landslide hazards, slope stability, geomorphology, electrical resistivity tomography, magnetic susceptibility, soil.

Е. Иваник, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: om.ivanik@gmail.com;

А. Меньшов, д-р геол. наук, ст. исследователь,

E-mail: menshov.o@ukr.net

Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.,

К. Бондарь, д-р геол. наук, ст. науч. сотр.,

Е. Гадяцкая, канд. геол. наук, инж.,

Л. Тустановская, канд. геол. наук, доц.,

Р. Хоменко, канд. геол. наук, ассист.

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕЙ В ПРЕДЕЛАХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНОГО УЧАСТКА ЛЫСАЯ ГОРА, КИЕВ)

Рассмотрено комплексирование геолого-геофизические и ГИС-методов для оценки геологической опасности в пределах урбанизированной среды. Принципиальным пробелом в изучении геологически опасных (оползни, эрозия, загрязнение и др.) территорий Украины является отсутствие информации о состоянии горных пород и почв, а также их взаимодействии с прошлыми и современными природными и антропогенными образованиями. Объектом исследования является территория оползневой активизации Лысой горы, Украина, расположенная в Голосеевском районе Киева. Несмотря на условную стабилизацию склона, оползни представляют реальную угрозу функционированию объектов инфраструктуры, в частности деформации железной дороги вдоль Столичного шоссе. Получены результаты исследования оползнеопасных участков. Предложена эффективная методика, включающая геолого-геофизическую, термографическую съемку и дистанционное зондирование для мониторинга оползневых процессов и их локального прогнозирования на модельных участках. Результаты измерения методом электротомографии на Лысой горе выявили две локальные зоны активизации оползневых смещений, которые располагаются в диапазоне глубин 3–8 м от поверхности земли. Случайное распределение магнитной восприимчивости почвы и частотная зависимость магнитной восприимчивости в пределах ландшафтных пересечений и по вертикали в почвенных генетических горизонтах подтверждают наличие смещений, перераспределений и новоотложений почвы и подстилающих пород. Это связано с эрозионными и оползевыми процессами.

Ключевые слова: оползневая опасность, устойчивость склонов, геоморфология, электротомография, магнитная восприимчивость, почва.

УДК 54.027:546.22:549.76:551.44
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.05>

Т. Ахмедов, д-р геол.-минералог. наук, проф.,
E-mail: akhmedov.tofik@bk.ru,
Государственный университет нефти и промышленности,
г. Баку, Азербайджан

ДЕТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА КОМПЛЕКСИРОВАНИЕМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ОДНОКРАТНОГО И МНОГОКРАТНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

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

Скорости распространения сейсмических волн являются одним из важнейших кинематических параметров, от точности и полноты сведений о скоростях в конечном итоге зависит геологическая эффективность сейсморазведки. Рассмотрены способы определения эффективных скоростей по сейсмическим данным, предложенные за период применения метода отраженных волн. Способы определения скоростей разделены на 2 большие группы – в первую группу входят способы определения эффективных скоростей, основанные на автоматическом или визуальном прослеживании осей синфазности (т. е. годографов) отраженных волн на сейсмограммах ОТВ (общей точки взрыва) или ОГТ (общей глубинной точки), а затем их аппроксимации гиперболами, а во вторую группу включены способы, основанные на применении анализа сейсмического волнового поля по регулируемым направлениям. Указаны основные недостатки существующих способов, особо выделен промышленный способ, широко применяемый в настоящее время и основанный на анализе волнового поля по регулируемым направлениям, которые не дают достаточно точных и полных сведений для решения традиционной задачи кинематической интерпретации, т. е. перехода от временных разрезов в мигрированные глубинные. Предложен новый способ определения эффективной скорости, который кардинально отличается от способов, применяющихся до сих пор на практике сейсморазведки, т. к. данные сейсморазведки однократного и многократного профилирования используются не раздельно, как это было до сих пор, а комплексно. Выведены формулы для определения эффективной скорости по данным однократного и многократного профилирования. Разработана методика определения эффективной скорости и приведена последовательность процедур для решения поставленной задачи. Представлены результаты исследований на конкретном примере путем решения прямой и обратной задачи для площади Сагдаз междуречья Куры и Иори. Исследованы влияния погрешностей в значениях параметров, входящих в формулу расчета эффективной скорости на конечные результаты, а также перечислены основные преимущества предложенного способа.

Ключевые слова: сейсморазведка 2D и 3D, эффективная скорость, скорость суммирования, градиент времени, временные разрезы.

Введение. Скорости распространения сейсмических волн являются одним из важнейших параметров, используемых при решении ряда геологических задач, поставленных перед сейсмической разведкой 2D и 3D. Неопределенности в скоростной модели среды приводят к снижению точности и, в целом, геологической эффективности сейсморазведки. С начала применения сейсморазведки при поисках и разведке полезных ископаемых до настоящего времени, различными исследователями были предложены и применены разные способы определения скоростей по сейсмическим данным. Достаточно широкое применение получили работы С.А. Васильева, А.К. Урупова, В.М. Глоговского, Г.Н. Гогоненкова, А.В. Невинного, Н.Н. Пузырёва, А.Н. Лёвина и др. (Васильев и Урупов, 1978; Глоговский и Гогоненков, 1978; Невинный и Урупов, 1977; Пузырёв, 1979; Урупов и Лёвин, 1985). Перечисленные способы определения базируются в основном на использовании данных однократного профилирования МОВ (метода отраженных волн) и вышли из применения с появлением на практике МОГТ (метода общей глубинной точки).

Применяемые на практике алгоритмы определения $v_{ОГТ}$ по сейсмограммам ОГТ (или ОСТ – общей срединной точки при сейсморазведке 3D) основаны на предположении о правомерности аппроксимации годографов ОГТ (или ОСТ) гиперболами (Лёвин, 1977; Маловичко, 1979). Известно, что в сложных поверхностных и глубинных сейсмогеологических условиях годографы отраженных волн часто не имеют гиперболическую форму: на них образуются точки возврата, узлы и т. д., что приводит их к непригодной форме для определения скорости (Черняк, 1973; Bear et al., 2005; Robein, 2003). В настоящее время самым технологическим способом определения скоростей являются скорости суммирования, полученные при цифровой обработке данных (Jones, 2010; Ahmedov, 2005).

Постановка проблемы. Таким образом, скорости, полученные применением анализа волнового поля по регулируемым направлениям, являются основным источником информации об эффективных скоростях в настоящее время. Для заданных сейсмогеологических условий и при оптимальности предшествующей обработки информативность и точность вычислений $v_{ОГТ}$ (т. е. скоростного анализа) зависят от ширины временного окна анализа, гиперболичности годографа и его длины, вдобавок, этот способ, основанный на оптимизации сумм, на практике проводится на нескольких точках профиля, а между ними осуществляется линейная интерполяция. К тому же необходимо пересчитать скорости суммирования в эффективные скорости, т. е. учитывать влияние угла наклона отражающей границы на скорости ОГТ (Bancroft and Wang, 1994; Guirigay and Bancroft, 2010). Ручная или цифровая сейсмическая миграция дает лишь приближенную картину реальной геологической среды, т. к. преломления сейсмических лучей на промежуточных границах раздела не учитываются. А получение мигрированных глубинных разрезов требует точного знания скоростной модели среды, т. к. данная процедура очень чувствительна к изменениям скоростей (Guirigay, 2012; Wang, 1997). Таким образом, понятно, что на сложно-построенных площадях необходимо иметь более плотные и точные данные о скоростях как по разрезу, так и по площади.

Исследовательские вопросы. Предлагается новый способ определения эффективной скорости, который кардинально отличается от способов, применяющихся до сих пор на практике сейсморазведки, т. к. в этом способе данные сейсморазведки однократного и многократного профилирования используются комплексно. Продифференцировав уравнение годографа ОТВ (общей точки взрыва) отраженной волны по x , получим уравнение градиента времени:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v^2 t} \pm \frac{2h \sin \phi}{v^2 t}. \quad (1)$$

Над источником колебаний, т. е. над началом координат, выражение для градиента времени упрощается, так как при $x = 0$ время $t = t_0 = \frac{2h}{v}$, и первое слагаемое

в (1) равно нулю $\frac{x}{v^2 t} = 0$, тогда выражение для градиента времени с некоторыми допущениями принимает следующий вид:

$$\left(\frac{dt}{dx} \right)_0 = \pm \frac{\sin \phi}{v}. \quad (2)$$

Учитывая то, что при определении скоростей распространения сейсмических волн только абсолютные значения градиентов времени имеют значение, поэтому, опуская знаки в правой стороне выражения (2), найдем $\sin \phi$:

$$\sin \phi = v \cdot \left(\frac{dt}{dx} \right)_0. \quad (3)$$

Теперь продифференцируем по x уравнение годографа ОГТ отраженной волны:

$$\left(\frac{dt}{dx} \right)_{\text{ОГТ}} = \frac{x}{v_{\text{ОГТ}}^2 \cdot t_{\text{ОГТ}}}, \quad (4)$$

зная, что $v_{\text{ОГТ}} = \frac{v}{\cos \phi}$, подставим вместо $\cos \phi$ выражение (3), для эффективной скорости получим:

$$v_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{X}{\left(\frac{dt}{dx} \right)_{\text{ОГТ}} \cdot t_{\text{ОГТ}} + X \cdot \left(\frac{dt}{dx} \right)_0^2}}.$$

При применении на практике вместо градиента времени удобно пользоваться приращением времени Δt на базе приема Δx . Естественно, что величина Δx зависит от кривизны фронта отраженной волны, и с увеличением времени определения скорости можно ее увеличивать. Таким образом, окончательно для определения эффективной скорости получим:

$$v_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{X_m}{\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)_{\text{ОГТ}} \cdot t_{\text{ОГТ}} + X_m \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)_0^2}}, \quad (5)$$

здесь $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)_{\text{ОГТ}}$ – приращение времени по годографу ОГТ на базе приема Δx , центр которой расположен на расстоянии X_m от начала координат; $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)_0$ – приращение

времени по годографу ОТВ на базе приема Δx , центр которой находится в начале координат; $t_{\text{ОГТ}}$ – время на годографе ОГТ для абсциссы X_m .

Цель исследований. Основной целью данных исследований является разработка нового способа определения эффективной скорости комплексированием данных однократного и многократного профилирования, позволяющего массовое вычисление скоростей по профилю и разрезу и, тем самым, дающего более точное построение скоростной модели среды.

Методология. Эффективная скорость определяется в такой последовательности: выбираются и задаются

два параметра (X_m и Δx), входящие в выражение (5), и по наблюдаемому волновому полю определяют приращение времени на выбранной базе $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)_0$ и $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)_{\text{ОГТ}}$,

а также на годографе ОГТ для абсциссы X_m . Анализ формы годографа ОГТ отраженной волны, а также практика вычислений показывают, что абсциссу X_m целесообразно выбирать на удаленных расстояниях от начала координат, т. к. на этих удалениях годограф асимптотически приближается к прямой. Например, если длина расстановки приема равна 2,35 км, то для $X_m = 2,15$ км. Что касается Δx , то выбор значения этого параметра играет большую роль в точности определения скорости, т. к. если очень маленькое его значение приводит к некорректному определению приращений времени под влиянием нерегулярно распределенных факторов (например, таких, как зоны малых скоростей, рельефа, остаточных статических поправок, неоднородности покрывающей толщи и т. д.), то его большое значение ограничивается кривизной фронта волны, что существенно на малых временах регистрации. Опыт показывает, что для среднелинейного разреза на временах регистрации более 1,5 сек Δx может быть увеличено до 0,4 км. При определении по годографу ОГТ отраженной волны можно применять два способа: первый способ состоит из суммирования сейсмограмм вдоль регулируемого веера гиперболических годографов; во втором способе, более простом, используются данные скоростного анализа, по которым определяют время в центре базы, задавая абсциссы краев базы x_1 и x_2 , времена t_1 и t_2 , а также его приращение на этой базе.

Что касается градиента времени (т. е. приращения времени на базе), определяемого по годографу ОТВ в начале координат $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)_0$, то этот параметр может

быть определен по методу регулируемого направленного приема (МРНП) Л.А. Рябинкина, для применения которого при цифровой обработке сейсмических данных разработаны алгоритмы и программы ещё в середине 80-х годов прошлого столетия (Рябинкин, 1987).

Результаты исследований. Теперь продемонстрируем на конкретном примере эффективность предложенного способа определения скоростей. Сначала решим прямую задачу, т. е. для упрощенной модели среды площади Саждаг междуречья Куры и Габырры Азербайджана рассчитаем годографы ОТВ и ОГТ отраженных волн при разных глубинах отражающих границ. Пользуясь данными сейсмокаротажа скважины № 4 площади Саждаг (рис. 1) рассчитаем годографы для исходных данных: 1) $h = 1,0$ км; $v = 2,3$ км/с; 2) $h = 4,0$ км, $v = 2,6$ км/с; расчеты проводились для наклонной отражающей границы с углом наклона $\phi = 20^\circ$ и для горизонтальной границы $\phi = 0^\circ$, длина годографов равна 2,4 км. Рассчитанные и построенные годографы представлены на рис. 2.

Теперь приступим к решению обратной задачи и определим эффективную скорость $v_{\text{эф}}$ по рассчитанным годографам ОТВ и ОГТ. Примем, что $X_m = 2,15$ км, тогда в точке X_m $t_{\text{ОГТ}1} = 1,236$ с (при $h = 1,0$ км) $t_{\text{ОГТ}2} = 3,174$ с (при $h = 4,0$ км). На этих глубинах ($h = 1,0$ и $4,0$ км) градиенты времени на годографах ОТВ и ОГТ будут соот-

ветственно равны: $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)_0 = 0,184$ с/км ($h = 1,0$ км)

и $0,135$ с/км ($h = 4,0$ км), $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)_{\text{ОГТ}} = 0,29$ с/км ($h = 1,0$ км)

и 0,088 с/км ($h = 4,0$ км). Подставив значения этих параметров в выражении (5) на место, для эффективной скорости при разных глубинах получим следующие значения: при $h = 1,0$ км, $v_{эф} = 2,301$ км/с, а при $h = 4,0$ км, $v_{эф} = 2,608$ км/с. Если сравнивать полученные по

годографам значения эффективных скоростей с исходными данными, то увидим, что за исключением небольших погрешностей они полностью совпадают.

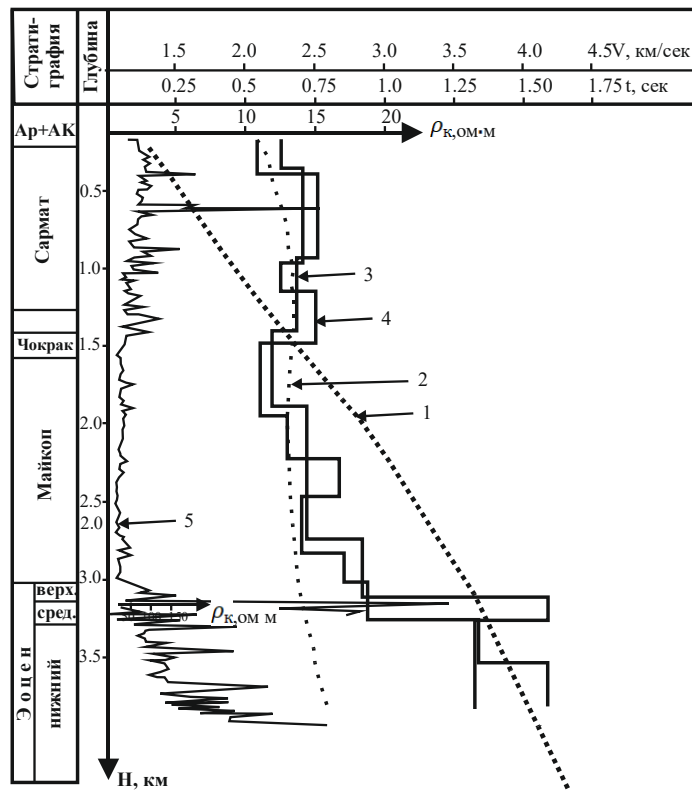


Рис. 1. Данные электро- и сейсмокаротажа скважины № 4 площади Саждаг междуречья Куры и Иори:
1 – вертикальный годограф; 2 – кривая средней скорости; 3 – пластовые скорости;
4 – интервальные скорости; 5 – кривая кажущегося сопротивления

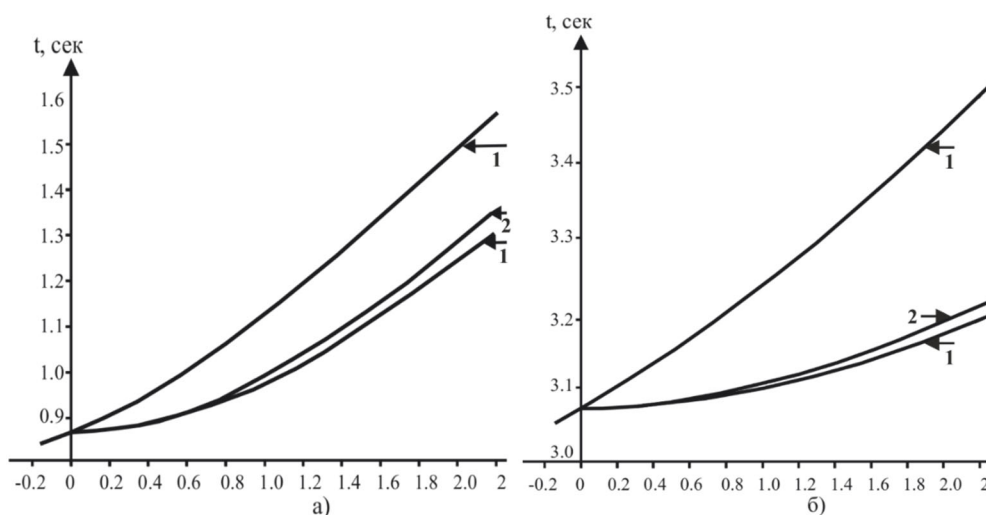


Рис. 2. Годографы ОТВ и ОГТ отраженных волн, рассчитанных по данным сейсмического каротажа скважины №4:
годографы при: а) – $h = 1,0$ км и б) – $h = 4,0$ км; 1 – годографы ОТВ и ОГТ (при $\varphi = 20^\circ$);
2 – годографы ОТВ и ОГТ (при $\varphi = 0^\circ$)

Исследуем возможные погрешности в значениях параметров, входящих в формулу расчета эффективной скорости и их влияния на окончательные результаты. Однозначно можно сказать, что при определении X_m невозможно допустить значительных погрешностей. Вместо времени $t_{ОГТ}$ возьмем t_0 и определим

градиенты времени $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_0$ и $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_{ОГТ}$ без учета кривизны фронта волны по полным годографам ОТВ и ОГТ. В практике сейсмических исследований широкое применение получили фланговые системы наблюдений,

и в этой связи определение градиента времени $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_0$

на базе, центр которой расположен над началом координат, встречает трудности. Поэтому смещение центра базы на некоторое расстояние от оси ординат (вернее оси времен) носит практическое значение и в этом случае очень важно изучать влияние члена x/v^2t , входящего в полную формулу (1) градиента времени годографа ОТВ, на конечные результаты. Если центр базы определения градиента времени $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_0$ сместить на расстояние

0,2 км от начала координат, то для эффективной скорости при разных глубинах получим соответственно:

$v_{эф1} = 2,238$ км/с и $v_{эф2} = 2,6$ км/с. Как видно смещение центра базы в сторону на малых временах оказывает существенное влияние на значение скорости, тогда как на больших временах оно незначительно. Если уменьшим длину базы и центр ее приблизим к началу координат, т. е. возьмем $\Delta x = 0,2$ км и $X_m = 0,1$ км, то для эффективной скорости получим $v_{эф1} = 2,263$ км/с и $v_{эф2} = 2,608$ км/с соответственно. Продолжая исследования в этом направлении, устанавливаем, что при $\Delta x = 0,1$ км и $X_m = 0,05$ км эффективные скорости приобретают следующие значения: $v_{эф1} = 2,290$ км/с и $v_{эф2} = 2,690$ км/с. Анализ полученных данных показывает, что если на малых временах с приближением базы определения градиента времени $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_0$ к началу координат и уменьшением ее

длины получаем желаемые результаты, то на больших временах увеличиваются погрешности определения эффективной скорости. С другой стороны, знаем, что уменьшение длины базы приводит к повышению влияния случайных факторов. Учитывая это, если мы, в случае фланговой системы наблюдений, при определении $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_0$ центр базы сместим на расстояние 0,2 км от

начала координат и ее длину возьмем равной $\Delta x = 0,4$ км, то для определения градиента времени будут использованы 17 трасс (при расстоянии между каналами 0,025 км), и мы получим достаточно высокую точность вычислений.

Разработанная методика определения эффективных скоростей и уточнения скоростной модели исследуемой среды была применена на данных сейсморазведки 3D на одной из площадей Азербайджанского сектора шельфа Каспийского моря, названного нами условно Хасилат III. Данная площадь неоднократно изучалась сейсморазведкой, но так как она осложнена тектоническими нарушениями разного направления и имеет блочное строение, это приводит к сложной волновой картине, и детальное строение площади, особенно по глубоко залегающим отложениям нижнего плиоцена, миоцена, осталось недостаточно изученным. Из-за сложности строения структуры и расположения глубоких скважин на разных блоках, а также недостаточной глубины исследований сейсмокаротажа и ВСП (вертикального сейсмического профилирования) полученная скоростная модель не позволяла получить достоверную информацию о глубинах целевых сейсмических горизонтов, прослеженных и прокоррелированных особенно в низах продуктивной толщи и подстилающих ее отложениях (рис. 3).

Стало очевидным, что существующие данные о скоростях не позволяют получить адекватные представления о геологическом строении площади Хасилат III. Поэтому была составлена скоростная модель среды с применением разработанной методики. Были проанализированы и обобщены все данные, полученные на площади, проведены расчеты и составлена трехмерная скоростная модель среды (рис. 4).

Затем на основе составленной скоростной модели были построены скоростные карты по целевым горизонтам, одна из которых приводится на рис. 5, на их основе временные разрезы 2D были трансформированы в глубинные, и была применена сейсмическая миграция.

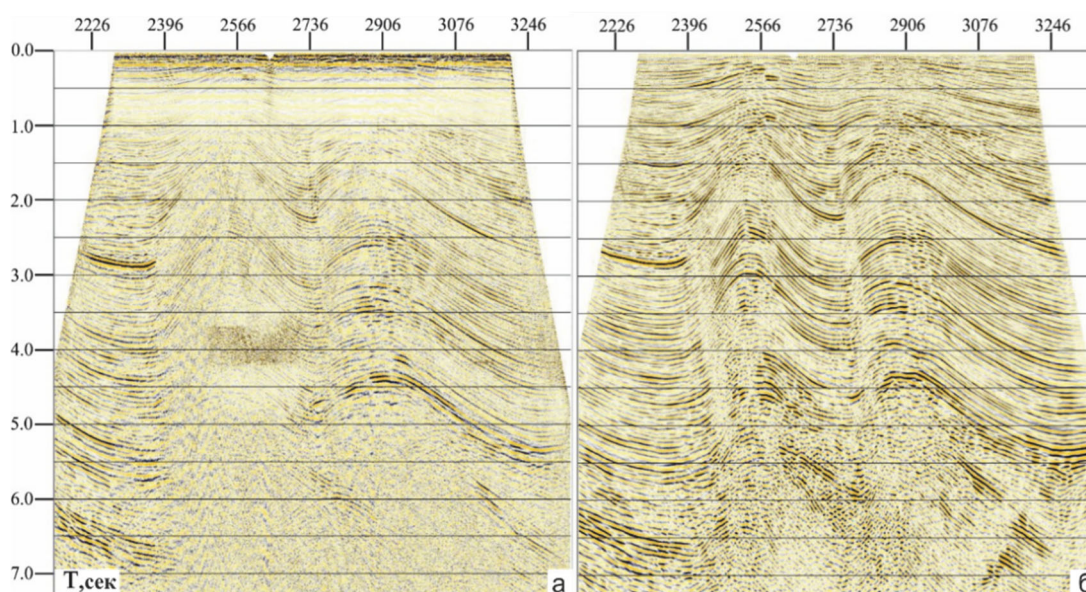


Рис. 3. Временной разрез по одному из профилей сейсморазведки 2D Хасилат:

а – после предварительной суммы; б – после деконволюции, финал stack, фильтрации и сейсмической миграции

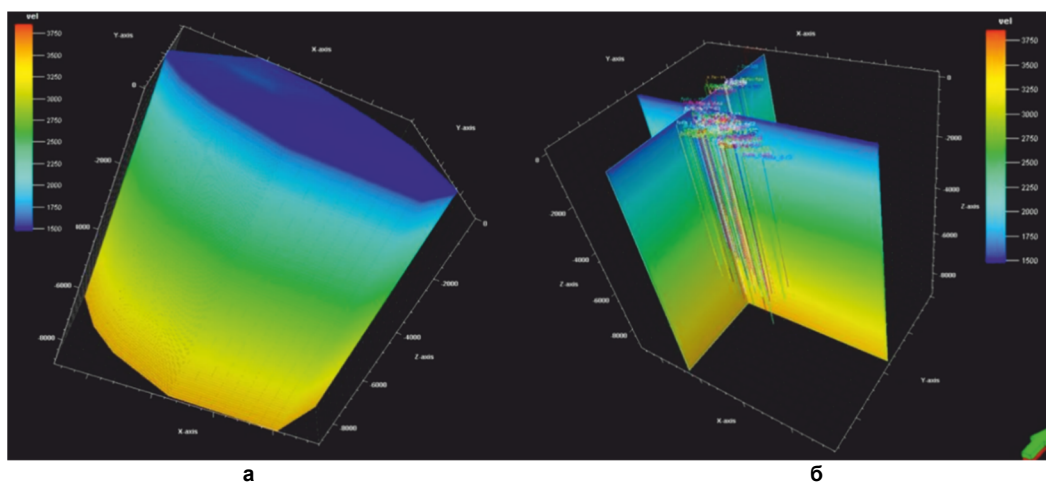


Рис. 4. Рассчитанные скоростные модели:

а – трехмерная модель; б – трехмерная модель со скважинами, вскрывшими сейсмический горизонт VIII, приуроченному к низам продуктивной толщи нижнего плиоцена

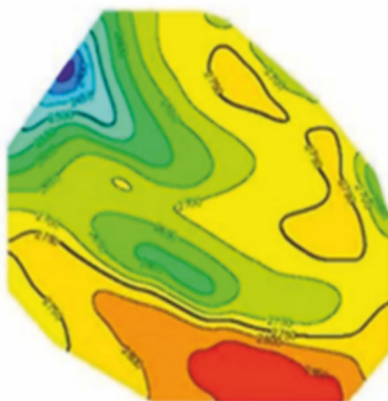


Рис. 5. Карта скоростей по СГ V продуктивной толщи

Заключение. 1. Анализ формулы определения эффективной скорости показывает, что из четырех параметров, X_m , $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_{OГТ}$ и $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_0$ определение первых трех

не встречает серьезных трудностей, а последний определяется по методике РНП (регулируемого направленного приема) Л.А. Рябинкина из сейсмограмм ряда, т. е. полевых сейсмограмм однократного профилирования.

2. Погрешности в определении не имеют большого влияния на конечные результаты, т. к. относительные ошибки в значениях скорости не превышают 2 %.

3. То же самое можно сказать о градиенте времени, определяемого по годографу ОГТ, т. е. $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_{OГТ}$. По-

грешности в определении этого параметра приводят к относительным погрешностям в значениях скорости, они не превышают 2 %.

4. Градиент времени, определяемый по годографу ОТВ $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)_0$, сильно влияет на значения скорости,

т. к. в этом случае относительные погрешности достигают 8 %, следовательно этот параметр должен быть определен с высокой точностью.

5. Предложенный способ определения технологичен и может быть легко применен на практике, т. к. современные системы цифровой обработки сейсмических данных

имеют программные средства, необходимые для определения всех параметров, входящих в формулу (5). Поэтому данный способ определения скорости может быть легко интегрирован в любой граф обработки.

Список использованных источников

- Васильев, С.А., Урупов, А.К. (1978). Новые возможности изучения скорости распространения сейсмических волн и строения среды по наблюдениям во взаимных точках. В кн.: Прикладная геофизика, вып. 92, с. 3–16. М.: Недра.
- Глоговский, В.М., Гогоненков, Г.Н. (1978). Сходимость итеративного метода определения пластовых скоростей по сейсмическим данным. В кн.: Прикладная геофизика, вып. 92, с. 65–77. М.: Недра.
- Гогоненков, Г.Н., Захаров, Е.Т., Эльманович, С.С. (1980). Прогноз детального скоростного разреза по сейсмическим данным. В кн.: Прикладная геофизика, вып. 97, с. 58–72. М.: Недра.
- Лёвин, А.Н. (1977). Предельная эффективная скорость при ОГТ для слоисто-однородных сред. В кн.: Прикладная геофизика, вып. 86, с. 3–11. М.: Недра.
- Маловичко, А.А. (1979). Определение предельной эффективной скорости и степени неоднородности по одиночному годографу отраженных волн в случае вертикально неоднородной среды. В кн.: Прикладная геофизика, вып. 95, с. 35–44. М.: Недра.
- Невинный, А.В., Урупов, А.К. (1977). Определение скоростей в средах с криволинейными границами (трехмерная задача). В кн.: Прикладная геофизика, вып. 88, с. 3–18. М.: Недра.
- Пузырёв, Н.Н. (1979). Временные поля отраженных волн и метод эффективных параметров. Новосибирск: Наука.
- Урупов, А.К., Лёвин, А.Н. (1985). Определение и интерпретация скоростей в методе отраженных волн. М.: Недра, с. 67–195.
- Черняк, В.С. (1973). Расчет эффективных скоростей в МОВ и МОГТ для слоистых сред с криволинейными границами. В кн.: Прикладная геофизика, вып. 71, с. 71–79. М.: Недра.
- Bear, L.K., Dickens, T.A., Krebs, J.R., Liu, J., Traynyn, P. (2005). Integrated velocity model estimation for improved positioning with anisotropic PSDM. *The Leading Edge*, 24, 622–626.

Robein, E. (2003). Velocities, Time-imaging and Depth-imaging in Reflection Seismics. Principles and Methods, EAGE.

Jones, I.F. (2010). An Introduction to: Velocity Model Building.

Ahmedov, T.R. (2005). Search for optimal velocity characteristics while seismic plotting. *Geophysics news in Azerbaijan Baki*, 1, 18–23.

Bancroft, J.C., Wang, S. (1994). Converted-wave prestack migration and velocity analysis by equivalent offsets and CCP gathers. *CREWES Research Report*, 6, 28.1-7.

Guirigay, T.A., Bancroft, J.C. (2010). Converted wave processing in the EOM domain. *CREWES Research Report*, 22, 23.1-24.

Guirigay, T. (2012). Estimation of Shear wave velocities from P-P and P-S seismic data using Equivalent Offset Migration. *M.S. thesis*, University of Calgary, Alberta, Canada.

Wang, S. (1997). Three-component and three-dimensional seismic imaging: *M.S. thesis*, University of Calgary, Alberta, Canada.

References

1. Vasiliev, S.A., Urupov, A.K. (1978). New possibilities for studying the speed of propagation of seismic waves and the structure of the environment from observations at reciprocal points. In the book: *Applied Geophysics*, vol. 92, pp. 3 - 16. M.: Nedra. [in Russian]
2. Glogovsky, V.M., Gogonenkov, G.N. (1978). Convergence of an iterative method for determining reservoir velocities from seismic data. In the book: *Applied Geophysics*, vol. 92, pp. 65 - 77. M.: Nedra. [in Russian]
3. Gogonenkov, G.N., Zakharov, E.T., Elmanovich, S.S. (1980). Prediction of a detailed velocity section based on seismic data. In the book: *Applied Geophysics*, vol. 97. M.: Nedra, p. 58 - 72.
4. Levin, A.N. (1977). Limiting effective speed at CDP for layered-homogeneous media. In the book: *Applied Geophysics*, vol. 86, pp. 3 - 11. M.: Nedra. [in Russian]
5. Malovichko, A.A. (1979). Determination of the limiting effective speed and degree of inhomogeneity from a single travel time curve of reflected

waves in the case of a vertically inhomogeneous medium. In the book: *Applied Geophysics*, vol. 95, pp. 35 - 44. M.: Nedra. [in Russian]

6. Nevinny, A.V., Urupov, A.K. (1977). Determination of velocities in environments with curved boundaries (three-dimensional problem). In the book: *Applied Geophysics*, vol. 88, pp. 3 - 18. M.: Nedra. [in Russian]
7. Puzyrev, N.N. (1979). Time fields of reflected waves and the method of effective parameters. Novosibirsk: Science. [in Russian]
8. Urupov, A.K., Levin, A.N. (1985). Determination and interpretation of velocities in the method of reflected waves. M.: Nedra, p. 67–195. [in Russian]
9. Chernyak, V.S. (1973). Calculation of effective velocities in MOV and CDP for layered media with curvilinear boundaries. In the book: *Applied Geophysics*, vol. 71, pp. 71 - 79. M.: Nedra. [in Russian]
10. Bear, L.K., Dickens, T.A., Krebs, J.R., Liu, J., Traynin, P. (2005). Integrated velocity model estimation for improved positioning with anisotropic PSDM. *The Leading Edge*, 24, 622-626.
11. Robein, E. (2003). Velocities, Time-imaging and Depth-imaging in Reflection Seismics. Principles and Methods, EAGE.
12. Jones, I.F. (2010). An Introduction to: Velocity Model Building.
13. Ahmedov, T.R. (2005). Search for optimal velocity characteristics while seismic plotting. *Geophysics news in Azerbaijan Baki*, 1, 18 – 23.
14. Bancroft, J.C., Wang, S. (1994). Converted-wave prestack migration and velocity analysis by equivalent offsets and CCP gathers. *CREWES Research Report*, 6, 28.1-7.
15. Guirigay, T.A., Bancroft, J.C. (2010). Converted wave processing in the EOM domain. *CREWES Research Report*, 22, 23.1-24.
16. Guirigay, T. (2012). Estimation of Shear wave velocities from P-P and P-S seismic data using Equivalent Offset Migration. *M.S. thesis*, University of Calgary, Alberta, Canada.
17. Wang, S. (1997). Three-component and three-dimensional seismic imaging: *M.S. thesis*, University of Calgary, Alberta, Canada.

Надійшла до редколегії 15.05.21

T. Ahmadov, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
E-mail: akhmedov.tofik@bk.ru
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

DETAILED STUDY OF THE VELOCITY SECTION BY INTEGRATING SEISMIC DATA OF SINGLE AND MULTIPLE PROFILING

The velocities of propagation of seismic waves are one of the most important kinematic parameters; the geological efficiency of seismic exploration ultimately depends on the accuracy and completeness of information about the velocities. Methods for determining effective velocities from seismic data, proposed for the period of application of seismic exploration by the method of reflected waves, are listed. The methods for determining the velocities are divided into 2 large groups: the first group includes methods for determining the effective velocities based on automatic or visual tracking of the in-phase axes (i.e. hodographs) of reflected waves on the seismograms of the OTP (common point of explosion) or CDP (common depth point), and then their approximation by hyperbolas, and the second group includes methods based on the use of seismic wave field analysis in controlled directions. The main disadvantages of the existing methods are indicated, the industrial method, which is widely used at the present time, is highlighted, based on the analysis of the wave field in controlled directions, which do not provide sufficiently accurate and complete information for solving the traditional problem of kinematic interpretation, i.e. transition from time sections to migrated deep ones. A new method for determining the effective velocity is proposed, which is fundamentally different from the methods used so far in the practice of seismic exploration, since in this method, seismic data of single and multiple profiling are used not separately, as it was until now, but in a complex manner. Formulas are derived for determining the effective speed from the data of single and multiple profiling. A method for determining the effective speed has been developed and a sequence of procedures for solving the problem is presented. The results of research on a specific example are given by solving the direct and inverse problems for the Sazhdag area of the Mesopotamia of the Kura and Iori rivers. The influence of errors in the values of the parameters included in the formula for calculating the effective speed on the final results is investigated. At the end of the article, the main advantages of the proposed method are listed.

Keywords: 2D and 3D seismic, effective velocity, stacking rate, time gradient, time sections.

T. Ахмедов, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,
E-mail: akhmedov.tofik@bk.ru,
Державний університет нафти і промисловості, м. Баку, Азербайджан

ДЕТАЛЬНЕ ВИВЧЕННЯ ШВИДКІСНОГО РОЗРІЗУ КОМПЛЕКСУВАННЯМ СЕЙСМІЧНИХ ДАНИХ ОДНОРАЗОВОГО ТА БАГАТОРАЗОВОГО ПРОФІЛЮВАННЯ

Швидкості поширення сейсмічних хвиль є одним з найважливіших кінематичних параметрів, від точності та повноти відомостей про швидкості в кінцевому підсумку залежить геологічна ефективність сейсморозвідки. Розглянуто способи визначення ефективних швидкостей за сейсмічними даними, запропоновані за час застосування методу відбитих хвиль. Способи визначення швидкостей розділені на 2 великі групи – до першої групи належать способи визначення ефективних швидкостей, що засновані на автоматичному або візуальному простеженні осей синфазності (тобто годографів) відбитих хвиль на сейсмограмах ЗТВ (загальної точки вибуху) або ЗГТ (загальної глибинної точки), а потім їх апроксимації гіперболами, а у другу групу включені способи, засновані на застосуванні аналізу сейсмічного хвильового поля за регульованими напрямками. Зазначено основні недоліки існуючих способів, особливо виділений промисловий спосіб, що широко застосовується у теперішній час і заснований на аналізі хвильового поля за регульованими напрямками, які не дають досить точних і повних відомостей для вирішення традиційної задачі кінематичної інтерпретації, тобто переходу від тимчасових розрізів у мігровані глибини. Запропоновано новий спосіб визначення ефективної швидкості, який кардинально відрізняється від способів, що застосовуються досі практичною сейсморозвідкою, оскільки дані сейсморозвідки одноразового та багаторазового профілювання використовуються не окремо, як це було донині, а комплексно. Виведено формули для визначення ефективної швидкості та наведено послідовність процедур для вирішення поставленого завдання. Наведено результати досліджень на конкретному прикладі шляхом вирішення прямої та зворотної задачі для площі Саждаж межириччя Кури та Іорі. Досліджено вплив помилок у значеннях параметрів, що входять у формулу розрахунку ефективної швидкості на кінцеві результати, а також перелічено основні переваги запропонованого способу.

Ключові слова: сейсморозвідка 2D та 3D, ефективна швидкість, швидкість підсумовування, градієнт часу, тимчасові розрізи.

R. Piriyeu,
E-mail: rahmanpiriyeu@bsu.edu.az,
Baku State University, Baku, Azerbaijan

REVIEW OF ELECTROMAGNETIC MONITORING STUDIES IN PREDICTING EARTHQUAKES: RECENT RESULTS AND NEW PERSPECTIVES

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

In order to make comparisons and find new perspectives in terms of electromagnetic phenomena in earthquake prediction, ULF range was chosen. For comparison, tables consisting of the results of studies from previous years and the last 10 years have been compiled. In order to find new perspectives, the graphs were drawn and comparative analysis was carried out on the basis of these results. It was concluded that the ULF precursors can be found before earthquakes reaching up to 30km in depth, and it can be considered a promising effective range in detecting precursors of earthquakes. In addition, due to the connection between the epicenter distances and the depths of the earthquakes and their magnitudes, attempts to detect the precursors have been made so that the epicenter of the earthquakes is ± 100 km. The article also provides information about ULF networks and about researchers who had critical opinions on electromagnetic phenomena associated with earthquakes.

Keywords: ULF, earthquake, prediction, electromagnetic, precursor.

Intoduction. Earthquake prediction is the human effort to predict the time which is called precursor time, the location where it can occur, and the magnitude, that's how strong an earthquake could be. It is one of the most important problems of modern geophysics (Hayakawa, 2015). The problem of prediction is still far from being solved (Schekotov et al., 2021). Depending on timescale earthquake prediction can be classified into 3 groups: long-term, medium-term and short-term prediction (Fig. 1). Using an earthquake catalogue it is possible to evaluate the long-term and medium-term occurrence probability of a large earthquake in a certain area during

a prescribed period and should not be considered as real predictions. But short-term prediction is the only useful and meaningful form for protecting human lives and social infrastructures. Short-term prediction absolutely requires study of earthquake precursors (Hayakawa, 2018). Earthquake precursor data can include geodetic signals such as tilt, GPS (Global Positioning System) data, hydrological data, electromagnetic fluctuations in various frequencies, emission of radon and other ionized gases, and anomalous animal behavior (Rikitake, 2001) (Fig. 2). Among these precursor data electromagnetic data take a special place (Fig. 3).

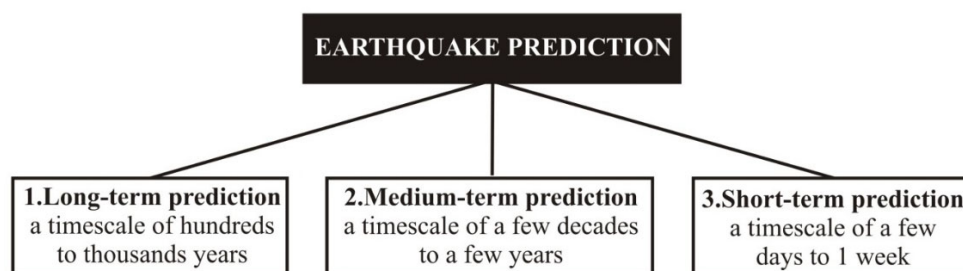


Fig.1. Classification of earthquake prediction (Hayakawa, 2018)

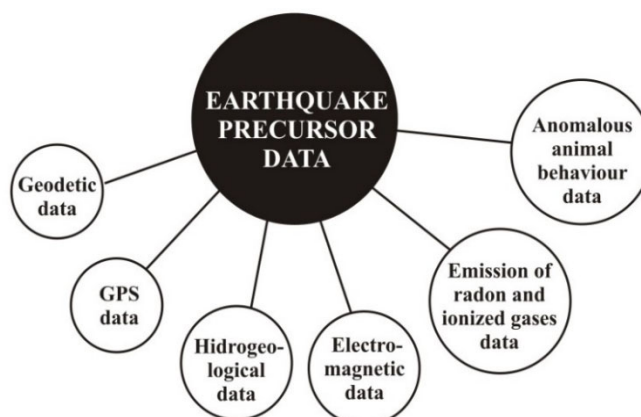


Fig. 2. Classification of earthquake precursor data (Rikitake, 2001)

If we take a look at the past, the unique case of the successful earthquake prediction was Haicheng (M=7.3, EQ in China) prediction. The earthquake occurred on February 4, 1975, in the north-east part of China. Scientists were able to predict it. After 1965, activation of seismicity occurred in an

area of 120km to SSW from Beijing with several destructive earthquakes with M>6. After this long-term prediction, Chinese government greatly strengthened earthquake study and precursor monitoring attaching to observation experts and also amateurs and scholars. Many middle-term

precursors were observed in 1973 and 1974 in a large area of 200x300 km which in December 1974 – January 1975 concentrated in a smaller area. In January 1975, quiescence of seismicity was observed but anomalies of groundwater, telluric currents, radon, tilt, animal behavior, etc. which considered short-term precursors increased till January 23, then

slightly decreased, and since February 1 rose in hundreds times. From February 3 to February 4 about 500 earthquakes with magnitude up to 4.2 as foreshocks of strong earthquake. Thousands of buildings collapsed, but hundred thousand lives have been saved by the well-timed prediction (Rokityansky *et al.*, 2019).

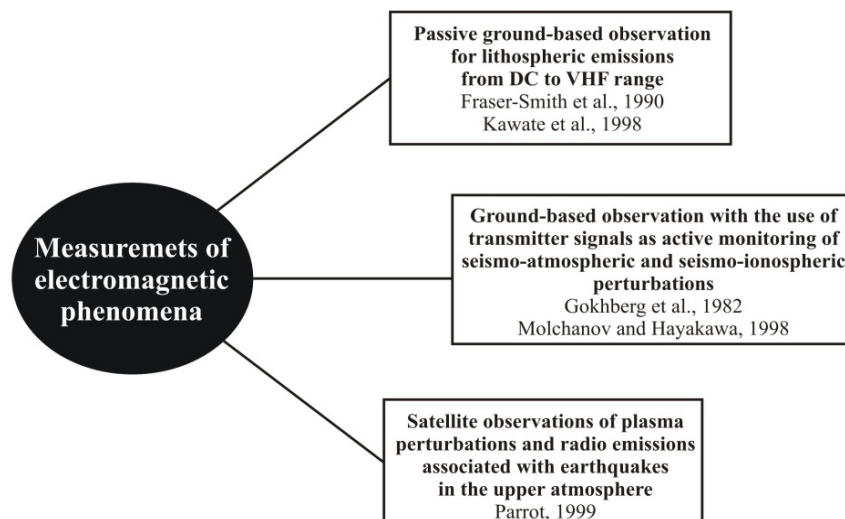


Fig. 3. Classification of measurements of electromagnetic phenomena (Hattori, 2004)

The ULF band is of particular interest because only EM signals in the ULF range and at lower frequencies can be easily recorded at the Earth's surface without significant attenuation compared with "high" frequency bands because most of the epicenter depths are at more than 10km, even several hundreds of kilometers, beneath the Earth's surface (Li *et al.*, 2013). ULF geomagnetic change is one of the most promising phenomena and it suggests that short-term prediction of earthquakes is realizable. Similar electromagnetic phenomena are associated with volcanic activity. Since source regions are well known for their volcanic activity, observation is easier than in seismic cases. Electromagnetic phenomena associated with volcanic activities have been summarized in the works of Johnston (1997) and Zlotnicki (2003) (Hattori, 2004).

Material and methods. The aim of this article is to review ULF electromagnetic phenomena associated with earthquakes, and try to make comparisons and find perspectives. Numerous researches conducted in connection with the study of earthquakes have shown that electromagnetic monitoring studies have led to some important results (Novruzov and Piriyeu, 2015; Piriyeu, 2021). The ULF range can be considered the ideal range for detecting earthquake precursors. This can be easily seen in Table 1.

The emergence of ULF precursors at different times causes scientists not to make accurate prediction. My main goal in describing the graph in Fig. 4, and in Fig. 5 is to see it more clearly. ULF precursors have been detected at different times before the earthquakes of different years since 1964. If we look at the graphs, the ULF precursors appeared before all earthquakes above 5 and at a depth of up to 30km. In addition, the distance between the epicenter of earthquakes and observation points reaches 800km. From here it can be concluded that there is a connection between the epicentral distance and the magnitude. Thus, it is possible to mark earthquakes with a magnitude above 5.0 at a higher epicenter distance. ULF precursors are found more frequently than other ranges at the same time. Most of the earthquakes since 1964 have been recorded in the ULF

range. There are also special cases in ULF precursors. For example, ULF precursors appeared three times before the Loma Prieta earthquake. The magnetometer was located only 7km from the epicenter and recorded increased ULF noise reaching 1.5 nT in amplitude during the month before, two weeks before, and a few hours before the earthquake (Johnston, 1997). No matter how hard it was to find new perspectives in term of electromagnetic phenomena, I have collected ULF precursory signatures before earthquakes in Fig. 4 and tried to make comparisons with ULF precursors and different frequency ranges, I proposed the graph shown in Fig. 5. As it can easily be seen from the graph, ULF precursors cover many places with respect to LF and VLF precursors. That means that ULF electromagnetic precursors may be associated with all earthquakes with magnitude above 5.0. The only difficult thing is that those precursors appear in different times prior to earthquakes. In Fig. 4 we can easily find the correlation between the magnitudes of earthquakes and their epicentral distances and depths. As the magnitude grows, the epicentral distance grows respectively. The ideal observation distance is ± 100 km from the epicenter. The other interesting fact is that ULF precursors can be detected by at least 1 observatory station (if there is more than one) prior to all earthquakes with the depth up to 30 km.

There are also ULF networks in different regions for the detection of ULF precursors in order to try to predict earthquakes. ULF networks are known to be installed in the Kanto area in Japan in order to be able to predict any earthquakes with $M \geq 6$ (Hayakawa and Hattori, 2004), in the Kamchatka area (Uyeda *et al.*, 2002), in Taiwan (Hattori *et al.*, 2002), in Greece (Makris *et al.*, 2003), etc.

There have been published few papers criticizing above mentioned precursors in different years. e.g. the validity of the reported 1989 M7.1 Loma Prieta precursor had been questioned by Thomas *et al.* (2009) and Campbell (2009), the subject of magnetic precursors remained controversial by Sevgi (2007), Masci and Thomas (2015). But they are very few in contrast with papers which presented electromagnetic precursors of earthquakes since 1964 till now.

Table 1

ULF electromagnetic precursors for different earthquakes

Earthquakes	Date	Magnitude	Depth	Epicentral distance	Observation station	Frequency range	Precursory time	Intensity
Spitak (Molchanov et al., 1992)	07.12.1988	6.9	6 km	128 km	Dusheti (Georgia)	0.0005-5 Hz	4 hours before EQ	0.2 nT
Loma Prieta (Fraser-Smith et al., 1990)	17.10.1989	7.1	15 km	7 km	Corralitos (USA)	0.01-10 Hz	3 hours before EQ	5 nT
Guam (Hayakawa et al., 1996)	08.08.1993	7.7	60 km	67 km	USGS staff GUAM	0.02-0.05 Hz	10 days-2 weeks and a few days before EQ	0.1 nT
Biak (Hayakawa et al., 2000)	17.02.1996	8.2	20 km	1200 km	Biak and Darwin (Australia)	5 mHz-30 mHz	1.5-1.0 months before EQ	0.2-0.3 nT
Chi Chi (Akinaga et al., 2001)	21.09.1999	7.6	11 km	120 km	Lunping	0.01 Hz	2.0 months before EQ	-
Sumatra-Andaman (Saroso et al., 2009)	26.12.2004	9.1	30 km	750 km	Kototabang (Indonesia)	-	1.5 month before the EQ	-
Sumatra-Nias (Saroso et al., 2009)	28.03.2005	8.6	30 km	750 km	Kototabang (Indonesia)	-	1.5 month before the EQ	-
L'Aquila (Prattes et al., 2011)	06.04.2009	6.3	8.8 km	630 km	L'Aquila (Italy)	10-15 mHz	2 weeks before the EQ	-
Sichuan (Li et al., 2015)	12.05.2008	7.9	19 km	80 km	Chengdu (China)	10-20 mHz	A few days before EQ	-
Tohoku (Ohta et al., 2013)	11.03.2011	9.1	29 km	30 km	- (Japan)	01-24 Hz	5 days before EQ	-

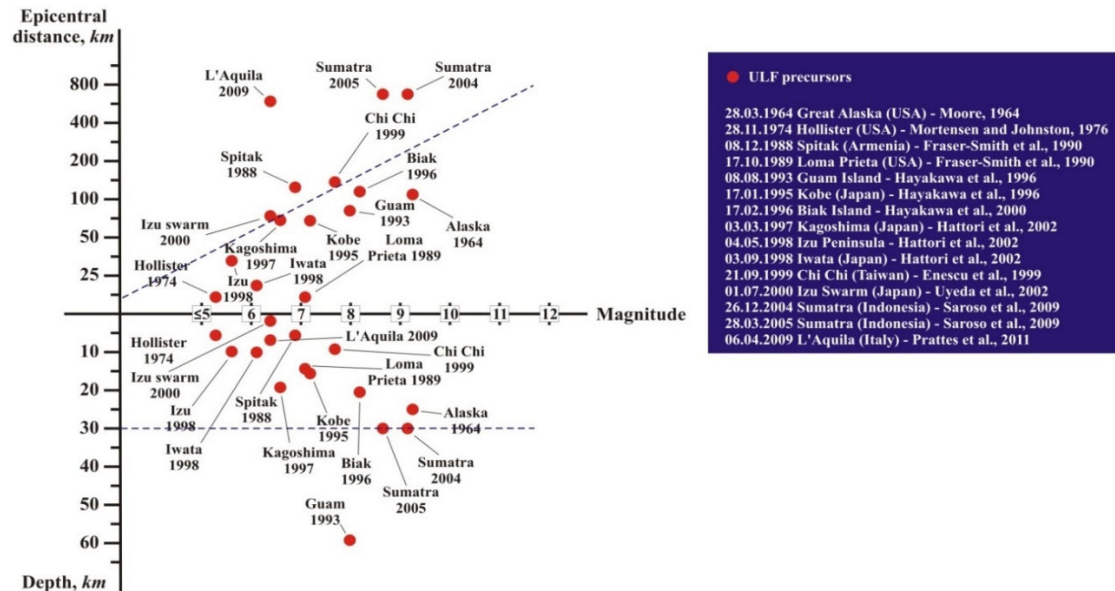


Fig. 4. ULF precursory signatures before earthquakes

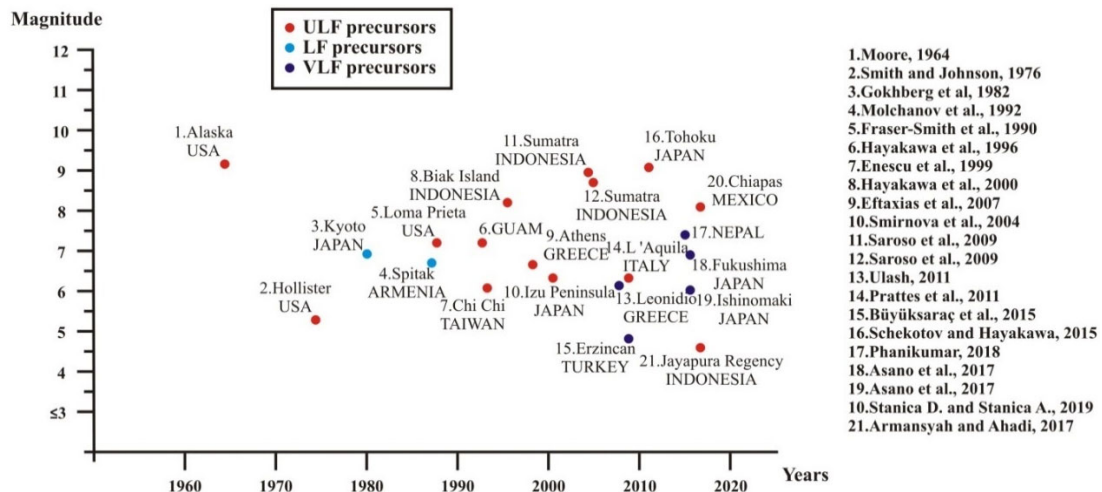


Fig. 5. ULF, LF, and VLF precursors of earthquakes

Recent results.

The study by Schekotov et al. (2021). To solve earthquake prediction problem, we need to be able to estimate its magnitude, time, and position of an upcoming event (Uyeda, 2013). This year Schekotov et al. (2021) tried to solve one task – to find the epicenter position of upcoming earthquakes. They used a method for predicting of the epicenter location region of Kamchatka and Commander earthquakes. This method was based on the properties of the precursory atmospheric ULF/ELF (1-30 Hz) radiation and the spatial statistics of local earthquakes in relation to the Kuril-Kamchatka and Aleutian trenches. This statistics showed that more than 90% of events with $M_L > 5$ occur in the gap ~ 150 km west of the Kuril-Kamchatka trench and north east of the Aleutian trench. Therefore, they obtained the approximate location of the epicenter by determining the position of the radiation source. Schekotov et al. (2021) supposed that it was caused by gas eruption from the heart of the earthquake to the trench and had the nearest location to the earthquake epicenter. The main drawbacks of the method were the dependence of its accuracy on the industrial interferences and the ambiguity of determining the epicenter location in the case of single-point registration of radiation when the main lobe of the azimuthal distribution of radiation crosses both trenches (Schekotov et al., 2021).

The study by Potirakis et al. (2019). There is another attempt by the scientists from Greece, Russia and Japan to use ULF magnetic field data from space weather monitoring magnetometer array in the study of earthquake precursors in Greece in 2019. They had analyzed the data from 4 stations of the Hellenic GeoMagnetic Array (ENIGMA) in the search for possible precursors to a strong earthquake that occurred south of Lesbos island on 12 June 2017. The magnitude of the earthquake was 6.3 and focal depth was 12 km. Potirakis et al. (2019) used the analysis which included conventional statistical methods, as well as criticality analysis, using NT-natural time method and MCF-the method of critical fluctuations. From conventional statistical methods, it was found by the scientists that the most convincing ULF precursors were observed in the data of ULF (20-30 mHz) depression of the horizontal component of the magnetic field. It was indicative

of lower ionospheric perturbation just 1 day before the earthquake. Therefore, there were indications of a precursor in the direct ULF emission from the lithosphere 4 days to 1 day before the EQ. Their further study in terms of NT analysis identified criticality characteristics from 8 to 2 days before the earthquake both for lithospheric ULF emission and ULF depression. MCF revealed indications of criticality in all recorded magnetic field components, extending from 10 to 3 days before the earthquake. Potirakis et al. (2019) had also analyzed the recordings of the fracto-electromagnetic emission stations of the Hellenic Seismo-ElectroMagnetics Network (ELSEM-Net) in Greece. The MHz recordings at the station that is located on Lesbos island presented criticality characteristics (NT and MCF) 11 days before the earthquake, while a few days later (7-6 days before the earthquake), the kHz recordings of the same station presented tricritical behavior. It was noted that the magnetosphere was quiet for a period of two weeks before the earthquake and including its occurrence (Potirakis et al., 2019).

The study by Schekotov et al. (2017). In April, 2016 a series of large earthquakes attacked the Kumamoto area of Kyusyu Island. The first two foreshocks had the magnitudes of 6.5 and 6.4, and about 1 day later there was the main shock on 15 April with magnitude 7.3 These were fault-type earthquakes, and Schekotov et al. (2017) would expect a variety of electromagnetic precursors to those earthquakes because they had detected different phenomena for the Kobe earthquake, the same fault-type earthquake. As for the lithospheric effect, the ULF data at Kanoya observatory which is about 150 km from the epicenter were used. Schekotov et al. (2017) used two – statistical and conventional analyses in order to provide with any evidence of ULF radiation. Only conventional analyses indicated clear signatures in the atmosphere as ULF/ELF impulsive emissions and also in the ionosphere as observed by means of VLF propagation anomalies and ULF depression. ULF/ELF radiation appeared on 8-11 April, while ULF depression took place on 8 and 10 April, so that both atmospheric radiation and ionospheric perturbation took place nearly during the same time period (Schekotov et al., 2017). The other recent works are shown in Table 2.

Table 2

Parameters of EQs

EQ	Magnitude	Date	Depth (km)	Frequency range	Method	Precursory moment	Researchers
Jayapura Regency (Indonesia)	4.5	2017	<50	ULF geomagnetic	Data processing and analysis polarization power ratio (Z/H) method	A few days before the EQ	Armansyah, and Ahadi, S., 2017
Tohoku (Japan)	9.0	11.03.2011	29	ULF geomagnetic	Geomagnetic observation	Geomagnetic anomalous changes over years	Rokityansky et al., 2019
Chiapas (Mexico)	8.1	08.09.2017	72	ULF geomagnetic	Geomagnetic observation Fast Fourier transform (FFT) method	5 hours before the EQ	Stănică, D.A., and Stănică D., 2019
Three EQs in the Indian peninsula	-	2010-2017	-	ULF magnetic	long-term analysis of ULF data	9-16 days before the EQ	Swati et al., 2020
Lebak, Banten (Indonesia)	6.1	23.01.2018	46	ULF geomagnetic	Fast Fourier Transform (FFT)	2 weeks before the EQ	Febriani et al., 2020
South-West, East Asia and South America	-	2007-2016	-	geomagnetic	Data processing and analysis	20 possible precursory sources before the EQ	Yusof et al., 2021

References

- Akinaga, Y., Hayakawa, M., Liu, J.Y., Yumoto, K., Hattori, K. (2001). A precursory signature for Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sci.*, 1, 33-36.
- Fraser-Smith, A., Bernardi, A., McGill, P. (1990). Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophysical Research Letters*, 17, 9, 1465-1468.
- Armansyah, Ahadi, S. (2017). Anomalous ULF signals and their possibility to estimate the earthquake magnitude. AIP Conference Proceedings 1857, 020006 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4987048>.
- Campbell, W.H. (2009). Natural magnetic disturbance fields, not precursors, preceding the Loma Prieta earthquake. *J. Geophys. Res.*, 114, A05307. doi:10.1029/2008JA013932.
- Febriani, F., Anggono, T., Syuhada, Prasetyo, A.D., Dewi, C.N., Hak, A.S., Ahadi, S. (2020). Investigation of the ultra low frequency (ULF) geomagnetic anomalies prior to the Lebak. Banten earthquake (M=6.1; January 23, 2018). *International conference on trends in material science and inventive materials: ICTMIM 2020*. AIP Conference Proceedings 2256, 090002.
- Fraser-Smith, A.C., Bernardi, A., McGill, P.R., Ladd, M.E., Helliwell, R.A., Villard, O.G. Jr. (1990). Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1465, 1990.
- Gokhberg, M.B., Morgounov, V.A., Yoshino, T., Tomizawa, I. (1982). Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan. *J. Geophys. Res.*, 87, 7824-7828.
- Johnston, M. (1997). Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. *Survey in Geophys.*, 18, 441-475.
- Kawate, R., Molchanov, O.A., Hayakawa, M. (1998). Ultra-low-frequency magnetic fields during the Guam earthquake of 8 August 1993 and their interpretation. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 105, 229-238.
- Hattori, K. (2004). ULF Geomagnetic Changes Associated with Large Earthquakes. *TAO*, 15, 3, 329-360, September 2004.
- Hattori, K., Takahashi, I., Yoshino, C., Nagao, T., Liu, J.Y., Shieh, C.F. (2002). ULF Geomagnetic and Geopotential Measurement at Chia-Yi, Taiwan. *J. Atmos. Electr.*, 22, 217-222.
- Hayakawa, M. (2015). *Earthquake Prediction with Radio Techniques*. John Wiley & Sons, Singapore.
- Hayakawa, M. (2018). *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*. Geophysical Monograph 234. Edited by D. Ouzounov, S. Pulnits, K.Hattori, P. Taylor. American Geophysical Union. John Wiley & Sons, Inc.
- Hayakawa, M., Hattori, K. (2004). Ultra-low-frequency electromagnetic emissions associated with earthquakes. *Inst. Electr. Engrs. Japan, Trans. Fundamentals and Materials*, 124, 12, 1101-1108.
- Hayakawa, M., Itoh, T., Hattori, K., Yumoto, K. (2000). ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on February 17, 1996. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1531-1534.
- Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, O.A., Yumoto, K. (1996). Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 241-244.
- Li, M., Lu, J., Parrot, M., Tan, H., Chang, Y., Zhang, X., Wang, Y. (2013). Review of unprecedented ULF electromagnetic anomalous emissions possibly related to the Wenchuan MS = 8.0 earthquake, on 12 May 2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 279-286. Retrieved from www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/279/2013/. doi:10.5194/nhess-13-279-2013.
- Li, Q., Schekotov, A., Asano, T., Hayakawa, M. (2015). On the Anomalies in ULF Magnetic Field Variations Prior to the 2008 Sichuan Earthquake. *Open Journal of Earthquake Research*, 4, 55-64. doi: 10.4236/ojer.2015.42005.
- Makris, J.P., Vallianatos F., Kopytenko Y., Smirnova N., Korepanov V., Kopytenko E., Soupios P., Vardiambasis I., Stampolidis A., Mavromatidis, A. (2003). ULF Geomagnetic Observations and Seismic Activity on the Southern Part of Hellenic Arc. *Geophysical Research Abstracts 5 (EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 06-11 April 2003, Nice, France)*, 12338 CDROM.
- Masci, F., Thomas, J.N. (2015). Are there new findings in the search for ULF magnetic precursors to earthquakes? *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 10, 289-304. doi:10.1002/2015JA021336.
- Molchanov, O.A., Hayakawa, M. (1998). On the generation mechanism of ULF seismogenic emissions. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 105, 201-210.
- Molchanov, O.A., Kopytenko, Y.A., Voronov, P.M., Kopytenko, E.A., Matishvili, T.G., Fraser-Smith, A.C., Bernardi, A. (1992). Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak (Ms = 6.9) and Loma Prieta (Ms = 7.1) earthquakes: Comparative analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1495-1498.
- Novruzov, E.S., Piriye, R.H. (2015). Efficiency of magnetotelluric monitoring in the study of geodynamic processes. *Gorno-geologicheskii zhurnal*, (3-4), 36-39. [in Russian]
- Ohta, K., Izutsu, J., Schekotov, A., Hayakawa, M. (2013). The ULF/ELF electromagnetic radiation before the 11 March 2011 Japanese earthquake. *Radio Sci.*, 48, 589-596. doi:10.1002/rds.20064.
- Parrot, M. (1999). Statistical studies with satellite observation of seismogenic effects. In: M. Hayakawa (Eds.) *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. TERRAPUB, Tokyo, 685-695.
- Piriye, R. (2021). Effectiveness of electromagnetic monitoring in studying earthquakes. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(2), 166-177. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i2.230195>.
- Potirakis, S.M., Schekotov, A., Contoyiannis, Y., Balasis, G., Koulouras, G.E., Melis, N.S., Boutsis, A.Z., Hayakawa, M., Eftaxias, K., Nomicos, C. (2019). On Possible Electromagnetic Precursors to a Significant Earthquake (Mw = 6.3) Occurred in Lesvos (Greece) on 12 June 2017. *Entropy*, 21, 241. doi:10.3390/e21030241
- Pratt, G., Schwingschuh, K., Eichelberger, H.U., Magnes, W., Boujdja, M., Stachel, M., Vellante, M., Villante, U., Wesztergom, V., Nenovski, P. (2011). Ultra low frequency (ULF) European multi station magnetic field analysis before and during the 2009 earthquake at L'Aquila regarding regional geotechnical information. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1959-1968.
- Rikitake, T. (2001). *Predictions and Precursors of Major Earthquakes: The Science of Macroscopic Anomalous Phenomena*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.
- Rokityansky, I.G., Babak, V.I., Tereshyn, A.V. (2019). Low-Frequency Electromagnetic Signals Observed before Strong Earthquakes. *Seismic Waves - Probing Earth System*. Open access peer-reviewed chapter. Published: September 27-th 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.88522>
- Saroso, S., Hattori, K., Ishikawa, H., Ida, Y., Shirogane, R., Hayakawa, M., Yumoto, K., Shiokawa, K., and Nishihashi, M. (2009). ULF geomagnetic anomalous changes possibly associated with 2004-2005 Sumatra earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34, 6-7, 343-349.
- Sevgi, L. (2007). A critical review on electromagnetic precursors and earthquake prediction. *Turk. J. Elec. Engin.*, 15, 1.
- Schekotov, A., Chebrov, D., Hayakawa, M., Belyaev, G. (2021). Estimation of the Epicenter Position of Kamchatka Earthquakes. *Pure Appl. Geophys.*, 178(3), 1-9. DOI:10.1007/s00024-021-02679-1
- Schekotov, A., Izutsu, J., Asano, T., Potirakis, S., Hayakawa, M. (2017). Electromagnetic Precursors to the 2016 Kumamoto Earthquakes. *Open Journal of Earthquake Research*, 6, 168-179. doi: 10.4236/ojer.2017.64010.
- Stănică, D.A., Stănică, D. (2019). ULF Pre-Seismic Geomagnetic Anomalous Signal Related to Mw8.1 Offshore Chiapas Earthquake, Mexico on 8 September 2017. *Entropy*, 21, 29. doi:10.3390/e21010029.
- Swati, Birbal Singh, Devbrat Pundhir, Ashwini K. Sinha, K. Madhusudan Rao, Anirban Guha, Yashuhide Hobara (2020). Ultra-low frequency (ULF) magnetic field emissions associated with some major earthquakes occurred in Indian Subcontinent. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 211, December 2020, 105469.
- Thomas, J.N., Love, J.J., Johnston, M.J.S. (2009). On the reported magnetic precursor of the 1989 Loma Prieta earthquake. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 173, 207-215. doi:10.1016/j.pepi.2008.11.014.
- Uyeda, S., Nagao, T., Hattori, K., Noda, Y., Hayakawa, M., Miyaki, K., Molchanov, O., Gladyshev, V., Baransky, L., Schekotov, A., Belyaev, G., Fedorov, E., Pokhotelov, O., Andreovsky, S., Rozhnoi, A., Khabazin, Y., Gorbatiyov, A., Gordeev, E., Chevrov, V., Lutikov, A., Yunga, S., Kasarev, G., Surkov, V. (2002). Russian-Japanese complex geophysical observatory in Kamchatka for monitoring of phenomena connected with seismic activity. In: M. Hayakawa and O. Molchanov (Eds.) *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling*. TERRAPUB, Tokyo, 413-420.
- Uyeda, S. (2013). Earthquake prediction in Japan. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 89(9), 391-400. <https://doi.org/10.2183/pjab.89.391>.
- Yusuf, K.A., Abdullah, M., Hamid, N.S.A., Ahadi, S., Yoshikawa, A. (2021). Correlations between Earthquake Properties and Characteristics of Possible ULF Geomagnetic Precursor over Multiple Earthquakes. *Universe*, 7, 20. <https://doi.org/10.3390/universe7010020>.
- Zlotnicki, J., Nisida, Y. (2003). Review of morphological insights of self-potential anomalies on volcano. *Surveys in Geophys.*, 24, 291-338.

Надійшла до редколегії 01.07.21

Р. Пирієв,

E-mail: rahmanpiriyev@bsu.edu.az

Бакінський державний університет, м. Баку, Азербайджан

ОГЛЯД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ МОНІТОРИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У ПРОГНОЗІ ЗЕМЛЕТРУСІВ:
ОСТАННІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА НОВІ ПЕРСПЕКТИВИ

Для проведення порівняння та пошуку нових перспектив застосування електромагнітних явищ у прогнозі землетрусів було обрано діапазон ультра низьких частот (УНЧ). Для порівняння складено таблиці, що містять результати досліджень минулих років, включаючи останнє десятиліття. Для того щоб знайти нові перспективи, було побудовано графіки та проведено порівняльний аналіз на основі цих результатів. Зроблено висновок, що передвісники УНЧ можуть бути перед землетрусами, що досягають глибин до 30 км,

і цей діапазон можна вважати перспективним ефективним діапазоном виявлення передвісників землетрусів. Крім того, через зв'язок епіцентральної відстані із глибинами землетрусів та їх магнітудами робилися спроби виявлення провісників так, щоб епіцентр землетрусів становив ± 100 км. Також наводиться інформація про мережі УНЧ та про дослідників, які мали критичні погляди на електромагнітні явища, пов'язані із землетрусами.

Ключові слова: УНЧ, землетрус, прогноз, електромагнітне поле, провісник.

Р. Пириев,

E-mail: rahmanpiriyev@bsu.edu.az

Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджан

ОБЗОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Для проведения сравнения и поиска новых перспектив применения электромагнитных явлений в прогнозе землетрясений был выбран диапазон ультра низких частот (УНЧ). Для сравнения составлены таблицы, состоящие из результатов исследований прошлых лет, включая последнее десятилетие. Для того чтобы найти новые перспективы, были построены графики и проведен сравнительный анализ на основе этих результатов. Сделан вывод, что предвестники УНЧ могут обнаруживаться перед землетрясениями, достигающими глубин до 30 км, и этот диапазон можно считать перспективным эффективным диапазоном обнаружения предвестников землетрясений. Кроме того, из-за связи эпицентральных расстояний с глубинами землетрясений и их магнитудами предпринимались попытки обнаружения предвестников так, чтобы эпицентр землетрясений составлял ± 100 км. Также приводится информация о сетях УНЧ и об исследователях, имевших критические взгляды на электромагнитные явления, связанные с землетрясениями.

Ключевые слова: УНЧ, землетрясение, прогноз, электромагнитное поле, предвестник.

УДК 553.982.22:553.981.2:551.87
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.07>

Г. Насибова, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: gultar_nasibova_1@yahoo.com;
Х. Мухтарова, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: mukhtarova.khuraman@mail.ru
Р. Нариманов, магистр
E-mail: nariman.narimanov40@asoiu.edu.az;
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
пр. Азадлыг, 34, г. Баку, AZE1010, Азербайджан

КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ОТЛОЖЕНИЙ НИЖНЕГО ПЛИОЦЕНА ПЛОЩАДИ УМИД БАКИНСКОГО АРХИПЕЛАГА

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

Целью данного исследования являются изучение и анализ коллекторских свойств отложений нижнего плиоцена площади Умид Бакинского архипелага и перспективы ее нефтегазоносности.

Одним из последних исследований на площади Умид является геологическая оценка пластовых параметров для подсчета запасов углеводородов. Ранее полученные результаты позволили более достоверно подсчитать запасы углеводородов и планировать поисково-разведочные работы в правильном направлении. В 2009 году на V и VII горизонтах продуктивной толщи были выявлены залежи с большими запасами газоконденсата. Так, в скв. № 10 на интервале глубин 6340–6356 м были получены 1,2 млн м³/сут газа и 150 т конденсата. Учитывая, что месторождения углеводородов в Южно-Каспийской впадине (ЮКВ) являются, как правило, многоярусными, то имеется основание прогнозировать наличие углеводородных скоплений и в более глубокозалегающих толщах.

В проведенных ранее исследованиях комплексно не изучалась закономерность изменения коллекторских свойств, таких как гранулометрический состав, карбонатность, пористость, проницаемость, плотность, скорость распространения ультразвуковых волн в породах.

В нашей работе изучено влияние структурно-тектонической характеристики поднятия Умид Бакинского архипелага ЮКВ на формирование грязевого вулкана на юго-восточном периклинальном погружении. С учетом влияния сжимающих напряжений на положение свода складки и кратера грязевого вулкана в связи с конседиментационным развитием поднятия, обосновываются рекомендации по месту заложения поисковых скважин для глубокозалегающих горизонтов.

Формирование коллекторских свойств пород зависит от тектонических напряжений, возникающих в них. В тектонически активных зонах высока вероятность возникновения в породах вторичных коллекторских свойств. Существует устойчивая обратная связь между коллекторскими свойствами, карбонатностью и глинистостью, прямая – со степенью отсортированности частиц, слагающих породы. Рассматриваемые в статье вопросы свидетельствуют о высокой вероятности наличия здесь углеводородных скоплений и в более глубокозалегающих горизонтах осадочного разреза.

В будущем, основываясь на проведенных нами исследованиях и геолого-геофизических методах, можно будет детально оценить перспективы глубокозалегающих стратиграфических единиц данной площади, а также идентичных ей.

Ключевые слова: коллектор, плотность, пористость, проницаемость, карбонатность, породы, коллекторские свойства.

Введение. Складка Умид приурочена к центральной части Бакинского архипелага Южно-Каспийской впадины (ЮКВ) (рис. 1). Разрез отложений, принимающих участие в ее строении, изучен до диатомовой свиты (N_1^{2-3d}) включительно (Ахмедов, 2008).

В тектоническом отношении структура Умид представляет собой брахиантиклинальную складку, вытянутую в юго-восточном направлении при длине около 13–16 км и ширине 4–5 км (рис. 1). Углы падения пластов на ее юго-западном крыле составляют 10–12°, на северо-восточном – 28–30° и возрастают с глубиной, что является одним из признаков ее конседиментационного развития. Складка в районе свода осложнена региональным осе-продольным разрывом, под воздействием которого ее юго-западное крыло опущено относительно северо-восточного на 100–400 м (рис. 2, 3) (Алиев и др., 2015).

В рельефе дна складка выражена мелководьем на фоне общего погружения дна моря в южном и юго-восточном направлениях с батиметрией 60–70 м. Очевидно, причиной является осложнение дальнего юго-восточного периклинального погружения складки грязевого вулканом (рис. 2) (Халилов, 2005).

Известно, что грязевой вулкан является следующим этапом развития глиняного диапира, который, как правило, осложняет свод локального поднятия (Нариманов и др., 2003; Гурбанов и др., 2016). Однако, ввиду того, что в пределах Бакинского Архипелага большинство локальных поднятий имеют в основном конседиментационный характер развития и, в связи с их осложнением грязевулканизмом в процессе развития, в зависимости

от направления воздействия тектонических напряжений, свод складки может смещаться в направлении какого-либо ее крыла или периклинали, т. е. в направлении воздействующих сил, как это имеет место у структуры Умид (рис. 2).



Рис.1. Схема расположения локальных поднятий Бакинского архипелага в ЮКВ (Исмаил-заде и др., 1990).
Условные обозначения: 1 – известные месторождения;
2 – перспективные структуры

© Насибова Г., Мухтарова Х., Нариманов Р., 2022

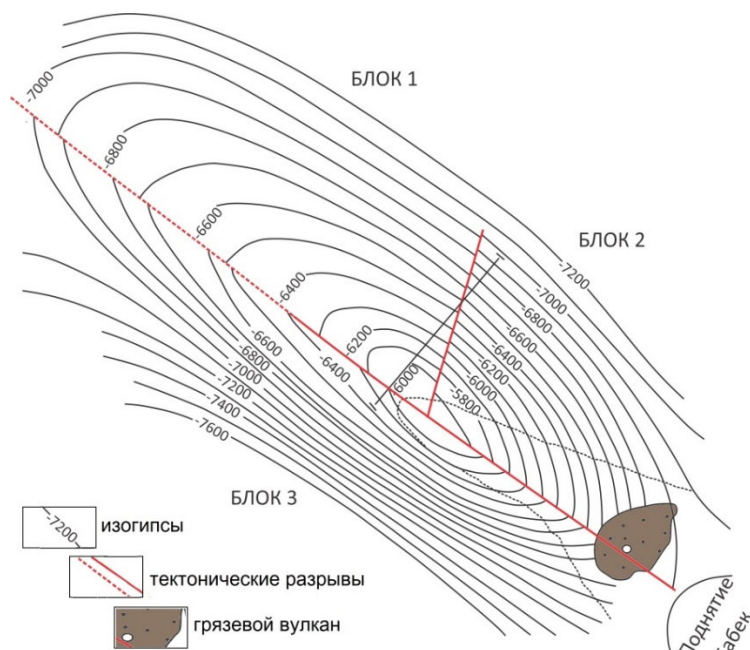


Рис. 2. Структурная карта по кровле VII горизонта площади Умид (Исмаил-заде и др., 1990)

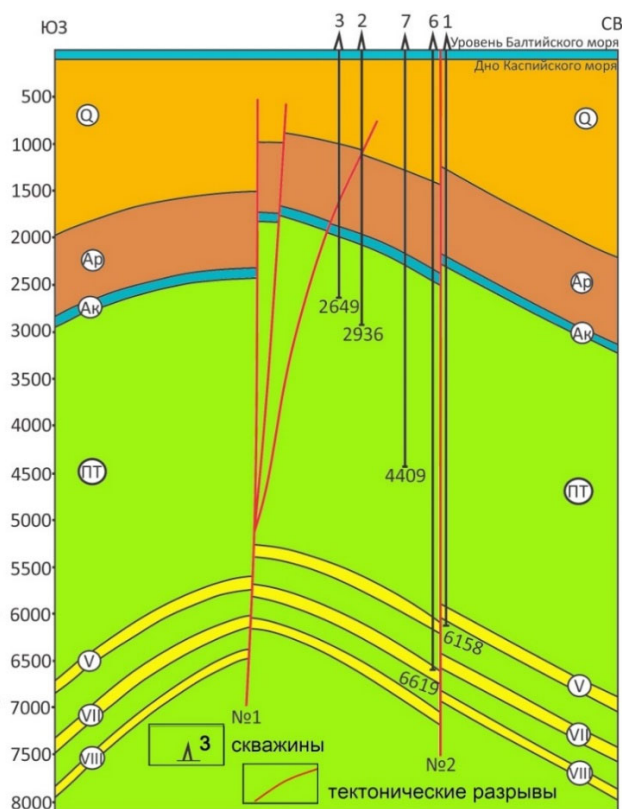


Рис. 3. Поперечный сейсмогеологический профиль по линии I – I (Исмаил-заде и др., 1990)

Цель исследования. Целью данного исследования являются изучение и анализ коллекторских свойств отложений нижнего плиоцена площади Умид Бакинского архипелага и перспективы ее нефтегазоносности.

Связано это с тем, что если развитие складки носит непрерывный или прерывисто-непрерывный характер, сопровождающийся смещением свода, то развитие канала вулкана в осадочном разрезе обычно носит прерывистый характер. В результате при очередном извержении канал и кратер вулкана по вышезалегающим комплексам отложений оказываются на каком-то из

крыльевых или периклинальных погружений складки. Из сказанного следует, что при проектировании поисковых скважин на глубокозалегающие горизонты складки, осложненной грязевым вулканом, чтобы попасть в присводовую зону, скважины следует размещать с учетом смещения свода в направлении воздействия сжимающих напряжений. Особенно это касается вулканов с длительными перерывами между периодами их активности (Нариманов и др., 2003; Дортман и др. 1976).

Анализ последних исследований и публикаций. Одним из последних исследований на площади Умид-

Бабек является геологическая оценка пластовых параметров для подсчета запасов углеводородов. Полученные исследователями (А.М. Салманов, Е.Г. Ахмедов, Ф.В. Рагимов и др., 2019) результаты позволили более достоверно подсчитать запасы углеводородов и планировать поисково-разведочные работы в правильном направлении. С целью уточнения геологического строения и нефтегазоносности площади Умид с 1977 по 1993 год здесь было пробурено 9 скважин (рис. 3), из которых только две вскрыли VII горизонт продуктивной толщи (ПТ) – ПТ- N_2^1 . В процессе бурения скв. № 3 на интервале глубин 2360–2649 м наблюдалось газопроявление. Анализом отобранных образцов газа было установлено, что они состоят на 74,10 % из метана, 5,14 % – этана и на 15,2 % – азота. Следующий образец состоял на 62,66 % из метана, 3,62 % – из этана, а остальная часть была представлена другими компонентами. При бурении скв. № 2 на глубине 2323 м также наблюдалось газопроявление, у последующих скважин в верхах ПТ были отмечены газо- и водопроявления. Сква. № 1 с проектной глубиной в 6158 м на интервале 5920–6060 м вскрыла V горизонт ПТ.

Образец керна, отобранный из интервала 6036–6037 м был газонасыщенным. В образцах, отобранных из V горизонта, в скв. № 4 на глубинах 6152–6300 м, 6176–6177 м и 6215–6220 м также наблюдались признаки газоносности. В скв. № 4 из VII горизонта в интервале 6673–6664 м при пробном испытании был получен приток, а из V горизонта в интервале 6234–6179 м был получен слабый приток воды и газа. Предполагалось, что причиной была высокая плотность глинистого раствора (2220 кг/м^3), который забил пустоты коллекторов.

Ранее нерешенные проблемы и задачи. Ни в одной из 9 пробуренных поисковых скважинах на площади Умид поставленная цель не была достигнута до конца, и большинство из скважин не вышли из кайнозойских отложений (Халилов, 2005).

Согласно Б.А. Соколову (Соколов, 1985), по условиям формирования очагов нефтегазообразования осадочные бассейны с геотермическим градиентом до $3^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ и скоростью осадконакопления до 40 м/млн лет относятся к пассивным, т. е. к вялым бассейнам. Однако при геотермическом градиенте до $3^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ с некомпенсированным прогибанием, несмотря на относительно высокую скорость осадконакопления в кайнозой, достигающую в среднем 280–300 м/млн лет, и с повышенной глинистостью олигоцен-плиоценовых отложений, ЮКВ относится к "холодным" бассейнам с лавинной седиментацией.

Известно, что глинистые породы характеризуются пониженной теплопроводностью, вследствие чего являются геотектоническими термоэкранами. Очевидно вследствие этого даже наличие "базальтового окна" не может способствовать формированию высокотемпературных условий в вышеуказанном олигоцен-плиоценовом разрезе ЮКВ. Следовательно, учитывая термоэкранирующую роль глинистых толщ вышеотмеченного стратиграфического интервала с относительно высоким содержанием органического вещества, также способствующего поглощению глубинного тепла в процессе преобразования его в углеводороды, становится ясным, почему ЮКВ с некомпенсированным прогибанием относится к типу "холодных" бассейнов. Очевидно в последних и, в частности, в ЮКВ, относительно низкий геотемпературный режим является следствием высокой глинистости разреза и активных процессов нефтегазообразования. Иначе несовместимы понятия об

уникальных запасах углеводородов и широкое развитие грязевулканизма в "холодном" бассейне типа ЮКВ (Мухтарова и Насибова, 2019).

Ввиду того, что ЮКВ является бассейном лавинной седиментации (Нариманов и др., 2003) надо полагать, что он должен быть нефтегазоносным в большей части разреза осадочных образований, это также обосновывает прогнозирование углеводородных скоплений на больших глубинах.

Согласно данным скважин, пробуренных на площади Умид, анализ нефтегазоносности исследуемой части разреза свидетельствует о преимущественно газовом и газоконденсатном составе исследуемого месторождения, формирование которого, очевидно, происходило в результате ступенчатой миграции в связи с осложненностью площади и всего Бакинского Архипелага относительно густой сетью разномасштабных дизъюнктивов (Гурбанов и др., 2016; Гулиев, 2017). Также, если учесть, что в пределах Бакинского Архипелага, равно как и в большей части ЮКВ, широко развит грязевулканизм, являющийся индикатором существования в ее осадочном разрезе мощных очагов нефте- и газогенерации (Гурбанов и др., 2016; Гулиев, 2017), то это также дает основание прогнозировать продуктивность относительно глубокозалегающих толщ осадочного разреза с развитием в них сжимающих напряжений, благоприятствующих миграции флюидов. Все эти факты, а также отсутствие определенной закономерности изменения, т. е. ухудшения или улучшения коллекторских свойств пород с глубиной, не исключают вероятности формирования и наличия в них углеводородных скоплений на больших глубинах в относительно жестких термобарических условиях и сжимающих напряжений, где породы могут преобразоваться в коллекторы за счет приобретения вторичной пористости и служить вместилищем для углеводородных скоплений (Нариманов и др., 2003; Гурбанов и др., 2016).

Параметры пород-коллекторов ПТ площади Умид близки к таковым месторождения Булла-море (Гулиев, 2017), что дает основание считать их благоприятными для накопления газа и конденсата.

Складка Умид занимает выгодное структурно-тектоническое положение на пути миграционного потока углеводородов из более погруженной части Джейранкечмеской депрессии, что позволяет прогнозировать формирование залежей здесь в глубокозалегающих толщах большей части развитых здесь локальных поднятий (рис. 4).

В 2009 году на площади Умид были выявлены залежи с большими запасами газоконденсата (V, VII горизонты). В скважине № 10 на интервале 6340–6356 м из низов VII горизонта Балаханской свиты были получены $1,2 \text{ млн м}^3/\text{сут}$ газа и 150 т конденсата. Если учесть, что месторождения нефти и газа в пределах ЮКВ, в том числе и Бакинского архипелага, являются, как правило, многоярусными, то есть основание прогнозировать наличие углеводородных скоплений и в более нижних – глубокозалегающих горизонтах ПТ.

V и VII горизонты ПТ, являющиеся основными объектами разработки на месторождения Бакинского архипелага, в том числе и на площади Умид, были вскрыты скважинами №№ 1, 4 и 6. Отмечены нефтегазоносность керна и газопроявления при бурении скв. № 3. Все это, включая положительное заключение комплекса геофизических исследований скважин, обосновывает продуктивность указанных горизонтов (Халилов, 2005).

При поисках, разведке, оценке потенциала и разработке нефтегазового месторождения одним из

важнейших условий является наличие информации о коллекторских характеристиках пород (Соколов, 1985). Вследствие этого проведение таких исследований в пределах месторождения Умид может способствовать более объективной оценке его нефтегазоносного

потенциала и осуществления дальнейшей разработки. С этой целью в глубоких поисково-разведочных скважинах из современных отложений вплоть до диатомовой свиты (N_1^{2+3}) включительно были отобраны и изучены образцы керна.

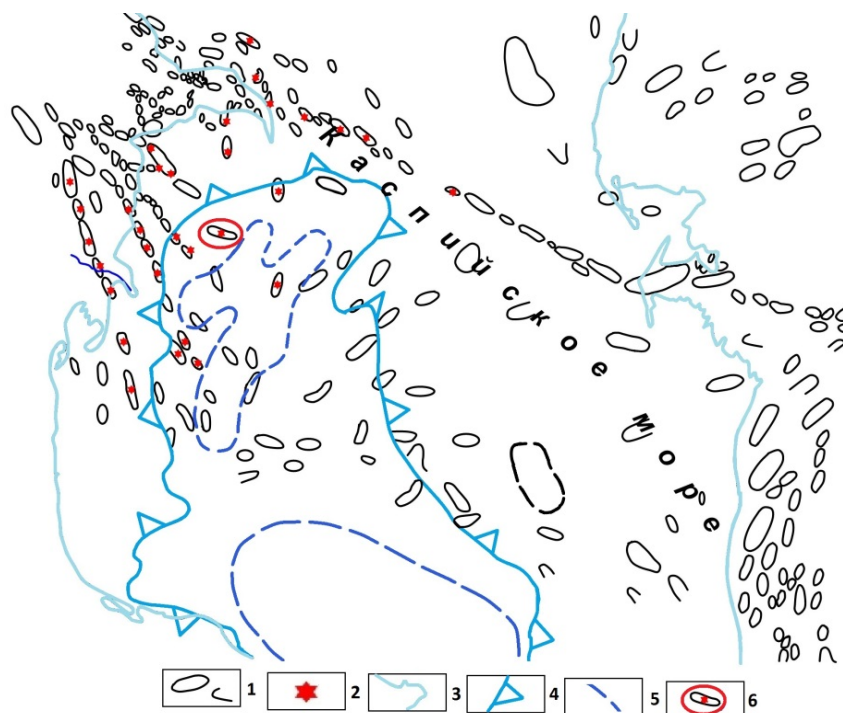


Рис. 4. Глубоководные впадины Южно-Каспийского бассейна – предполагаемые зоны более активной нефтегазогенерации (по материалам (Алиханов, 1976; Нариманов и др., 2003)).

Условные обозначения:

- 1 – структуры и структурные выступы; 2 – грязевые вулканы; 3 – границы Каспийского моря; 4 – внешняя граница глубоководной впадины и направления предполагаемых миграций УВ; 5 – предполагаемая внутренняя граница глубоководной впадины; 6 – объект исследования – локальное поднятие Умид

В пределах Бакинского архипелага отложения продуктивной толщи обладают широким распространением, большой мощностью и нефтегазоносностью. Нами были рассмотрены особенности изменения литофациального состава, карбонатности, коллекторских свойств, плотности (σ , г/см) и скорости распространения сейсмических волн в горных породах рассматриваемой площади на интервалах глубин 1740–6220 м. Анализ гранулометрического состава пород ПТ месторождения Умид указывает в основном на их алевроитовый состав. Отдельные случаи их фациальных изменений и относительно резкого количественного уменьшения алевроитов в разрезе могут быть связаны с относительно кратковременными изменениями глубин бассейна и количественным привносом материала, т. е. палеогеографическими условиями с доминированием малых и средних глубин в бассейне.

Результаты научных исследований. Изучение коллекторских характеристик пород, а также построение графиков их изменения с глубиной позволили более объективно оценить их коллекторские свойства. Установлено, что в некоторых случаях, на относительно больших глубинах наблюдается сохранение или появление новых коллекторских свойств пород. Согласно построенным графикам изменения коллекторских характеристик пород с глубиной они в основном не претерпевают каких-либо резких изменений. Так, например, в интервале глубин 1740–5984 м в составе пород псаммитовая фация изменяется в пределах 8,6–24,0 %, порой исчезая полностью (интервал 2530–2535 м), а в

двух случаях содержание этой фации достигает 59,3 % на глубинах 3749–3754 м и 70,2 % в интервале 6218–6220 м. В первом случае относительно высокое содержание этой фации с карбонатностью до 12,4 % и плохой отсортированностью частиц, слагающих породу, способствовали снижению пористости и проницаемости относительно предыдущего интервала до 12,4 и 6,75 % соответственно, что привело к возрастанию плотности пород и скорости сейсмических волн в них (рис. 5).

В случае же полного отсутствия в породе псаммитов и максимального содержания пелитов (75,3 %) с карбонатностью 10 % (интервал 2530–2535 м) пористость и проницаемость уменьшились в разы в сравнение к выше рассмотренному интервалу, что свидетельствует об обратной связи между глинистостью и коллекторскими свойствами пород. При этом также уменьшились плотность и скорость сейсмических волн.

Интервал глубин 6218–6220 м на 70,2 % состоит из псаммитов и на 29,7 % из пелитов, с карбонатностью 12,6 %, пористостью – 10,9 %, плотностью – 2,10–2,31 г/см³ и скоростью сейсмических волн – 2300 м/сек. В данном случае, несмотря на весьма высокое содержание псаммитов их пустотное пространство оказалось забитым пелитовой фракцией в условиях относительно высокой карбонатности (12,6 %), отрицательно воздействующей на коллекторские свойства пород. Такое сочетание фаций и карбонатности свели до минимума проницаемость псаммитовой фракции, составив всего $9,5 \times 10^{-15}$ м².

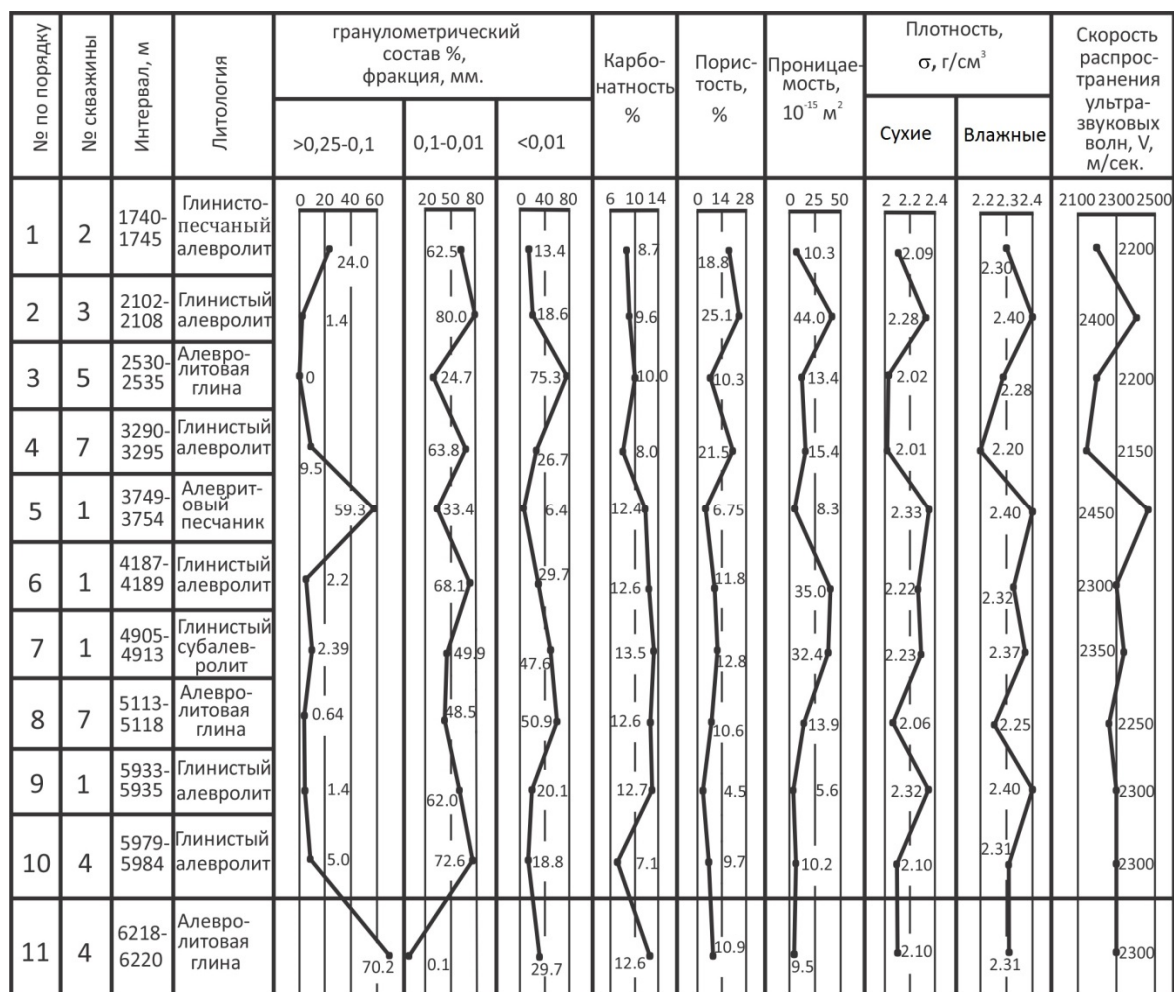


Рис. 5. Графики изменения коллекторских характеристик пород площади Умид

Анализ коллекторских характеристик пород свидетельствует о том, что основное отрицательное влияние на их коллекторские свойства оказывают повышенная карбонатность, содержание пелитов и низкая степень отсортированности частиц, слагающих породу. В то же время возрастание вязкости может благотворно повлиять на появление в ней вторичных коллекторских свойств при уровне тектонических напряжений выше предела ее прочности.

Как следует из графиков изменения коллекторских характеристик, в фациальном составе слагающих их пород, за исключением глубин 3749–3754 м, преобладают алевролиты и пелиты с карбонатностью от 7,1 до 13,5 %, что не благоприятствовало формированию лучших коллекторских свойств в рассматриваемых интервалах осадочного разреза (рис. 5).

Следует отметить, что в интервалах 2102–2108, 4187–4189 и 4905–4913 м проницаемость составляет (44,0; 35,0 и 32,4) $\times 10^{-15} \text{ м}^2$ соответственно. Эти показатели значительно выше, чем в остальных интервалах разреза. При этом фракционный состав интервалов характеризуется различной степенью отсортированности. Так, например, интервал с проницаемостью в 44,0 % состоит на 80 % из алевролитов и всего на 18,6 % из пелитов с относительно низкой карбонатностью (9,6 %) и самой высокой пористостью (25,1 %). В данном случае высокая пористость и проницаемость напрямую связаны с относительно высокой степенью отсортированности и низкой карбонатностью породы. Интервал 4187–4189 м

характеризуется несколько меньшей отсортированностью и большей карбонатностью (12,6 %). В этом случае карбонатность более отрицательно повлияла на пористость, уменьшив ее более чем в два раза, и проницаемость – до $35,0 \times 10^{-15} \text{ м}^2$. Очевидно, уменьшение пористости связано с частичным закупориванием пор в связи с возрастанием карбонатности. Плотность пород во втором интервале на сотые доли меньше чем в первом, что может быть связано с некоторым изменением минералогического состава пород. Во втором интервале, в соответствии с плотностью, уменьшилась и скорость сейсмических волн с 2400 до 2300 м/сек.

Следующий интервал (4905–4913 м) с проницаемостью 32,4 % имеет карбонатность 13,5 %, т. е. больше чем в выше рассмотренных интервалах, и характеризуется более низкой отсортированностью частиц при относительно высокой проницаемости. Это по всей вероятности указывает на наличие еще одного – тектонического – фактора, который в данном случае оказал положительное влияние на проницаемость. Из рис. 5 видно, что первичная пористость не имеет устойчивого одностороннего влияния на проницаемость, тогда как самое существенное влияние на последнюю имеет тектонический фактор, который помимо деформации пород контролирует осадконакопление, карбонатность, степень отсортированности, а также и коллекторские свойства пород в целом. Очевидно, что увеличение карбонатности способствует закрытию или заполнению первичных пор кристаллизационным материалом, и одновременно

возрастает вероятность приобретения породой вторичной пористости в случае роста тектонического или геостатического давления на толщии пород.

В остальных случаях интервалы рассматриваемого разреза характеризуются либо плохой отсортированностью частиц, слагающих породу, либо же высоким содержанием глинистости, как например у интервалов 1, 4, 5, 9 и 10 (рис. 5), при карбонатности от 7,1 до 12,7% и пористости от 4,5 до 21,5 %. Примечательно, что, несмотря на относительно большую пористость в интервале 1 (18,8 %) и низкую карбонатность в 8,7 %, проницаемость составляет всего $10,3 \times 10^{-15} \text{ м}^2$. Очевидно, здесь плохая отсортированность является основной причиной низкой проницаемости, а относительно большая пористость, по-видимому, является в основном субкапиллярной или закрытой. Наименьшие значения проницаемости (8,9; 5,6 и $9,5 \times 10^{-15} \text{ м}^2$) имеют интервалы 5, 9 и 11 соответственно, которые характеризуются в первую очередь плохой отсортированностью и почти одинаковой карбонатностью (12,4; 12,7 и 12,1 %). Пористость этих интервалов составляет 6,75; 4,5 и 10,9 % соответственно. В данном случае проницаемость имеет прямую зависимость от пористости (рис. 5).

В целом, несмотря на относительно большой рассматриваемый интервал осадочного разреза (1740–6220 м) площади Умид, плотность сухих пород с глубиной изменяется неупорядоченно в пределах от $2,01 \text{ г/см}^3$ в интервале глубин 3290–3295 м до $2,33 \text{ г/см}^3$ на глубинах 3749–3754 м. В свою очередь, минимальная плотность пород с относительно высоким содержанием влаги изменяется от $2,20 \text{ г/см}^3$ на глубинах 3290–3295 м, до $2,40 \text{ г/см}^3$ в интервалах, указанных на графике. В данном случае отсутствие закономерности в изменении плотности пород с глубиной свидетельствует не только об изменении коллекторской характеристики пород, но также и о возможном различии их минералогического состава. Поинтервальное изменение скоростей сейсмических волн с глубиной хорошо согласуется с плотностью пород (рис. 5).

Перспективы дальнейших исследований. Тектонические напряжения, возникающие в породах, оказывают влияние на формирование их коллекторских свойств. Вероятность возникновения в породах вторичных коллекторских свойств особенно высока в тектонически активных зонах. Существует устойчивая обратная связь между коллекторскими свойствами, карбонатностью и глинистостью, прямая – со степенью отсортированности частиц, слагающих породы. Также о высокой вероятности наличия на площади Умид углеводородных скоплений в более глубокозалегающих горизонтах осадочного разреза, свидетельствуют сделанные нами в статье выводы.

Дальнейшие исследования, а также геолого-геофизические методы позволят более детально оценить перспективы глубокозалегающих стратиграфических единиц как данной площади, так и площадей идентичных ей.

Выводы. Анализ результатов геологических исследований, данных бурения и изменения коллекторских характеристик пород с глубиной месторождения Умид позволяет сделать следующие выводы.

1. Формирование коллекторских свойств пород также зависит от тектонических напряжений, возникающих в них, и приводящих как к уплотнению, так и к разуплотнению, т. е. возникновению вторичной пористости в породах. В тектонически активных зонах возрастание вязкости осадочных пород благоприятствует возникновению в них вторичных коллекторских свойств.

2. В осадочных породах существует устойчивая обратная связь между коллекторскими свойствами, карбонатностью и глинистостью и прямая – со степенью отсортированности частиц, слагающих породу.

3. Анализ коллекторских характеристик пород площади Умид, осложненность ее грязевым вулканом и открытие в низах VII горизонта балаханской свиты залежи с дебитом $1,2 \text{ млн м}^3/\text{сут}$ газа и 150 т/сут газоконденсата, свидетельствует об отсутствии какой-либо закономерности в изменении коллекторских свойств пород со стратиграфической глубиной, что не исключает наличия здесь значительных углеводородных скоплений на больших глубинах, связанных, по всей вероятности, с вторичной пористостью.

4. При проведении поисково-разведочного бурения на глубокозалегающие горизонты на структурах с "мигрирующим" сводом поисково-разведочные скважины следует размещать с учетом смещения свода складки в направлении воздействия сжимающих напряжений, ориентируясь на современное положение кратера вулкана.

Список использованных источников

- Алиев, Ад.А., Гулиев, И.С., Дадашов, Ф.Н., Рахманов, Р.Р. (2015). Атлас грязевых вулканов мира. Национальная Академия Наук Азербайджана. Институт Геологии и Геофизики. Баку: "Nafta-Press".
- Алиханов, Э.Н. (1976). Нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра.
- Ахмедов, А.М. (2008). О геологической характеристике и перспективах нефтегазоносности площади Умид. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 3, 19–22.
- Гулиев, И.С., Керимов, В.Ю., Осипов, А.В., Мустаев, Р.Н. (2017). Генерация и аккумуляция углеводородов в условиях больших глубин земной коры. *SOCAR Proceedings*, 1, 4–16.
- Гурбанов, В.Ш., Султанов, Л.А., Нариманов, Н.Р., Бабаев, М.С. (2016). Петрофизические особенности пород ПТ месторождения Гарасу Бакинского архипелага в условиях существующего геодинамического режима. *Scientifik – Discussion. Praha*, 2 (2), 6–11.
- Дортман, Н.Б. и др. (1976). Физические свойства горных пород и полезных ископаемых, М.: Недра.
- Исмаил-заде Т.А. и др. (1990). Атлас нефтегазоносных и перспективных структур Каспийского моря. Ленинград: НИГИ.
- Керимов, А.А., Гусейнов, Г.М., Нариманов, Н.Р. (1995). Геодинамические аспекты проявления диапиризма и грязевулканизма. *Тезисы докладов III международной конференции Азербайджанского сообщества геологов-нефтяников*, 4–5.
- Мухтарова, Х.З., Насибова, Г.Д. (2019). О продуктивности и петрофизических характеристиках коллектора северной части Бакинского архипелага. *Web of Scholar. Multidisciplinary Scientific Journal*, 9 (39), 21–29.
- Нариманов, Н.Р., Бабаев, М.С., Рагимов, Ф.Н. (2003). Особенности развития локальных поднятий северной части Бакинского архипелага. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*, 2, 1–7.
- Нариманов, Н.Р., Насибова, Г.Д. (2016). Факторы, влияющие на развитие локальных поднятий и грязевых вулканов впадин Кюр-Габырры, Шамахи-Гобустан и Туркменского шельфа. *Тезисы тематической конференции посвященной развитию теорий академиков А. Ализаде и Ш. Мехтиева "Образование, миграция и накопление углеводородов"*, 15.
- Соколов, Б.А. (1985). Эволюционно-динамические критерии оценки нефтегазоносности недр. М.: Недра.
- Халилов, Н.Ю. (2005). Перспективы нефтегазоносности глубоководных структур Южного Каспия: Апшерон, Умид, Бабек. *Azerbaijan Geology*, 10, 8–21.
- Gurbanov, V.Sh., Narimanov, N.R., Sultanov, L.A., Babaev, M.S. (2017). On the results of petrophysical studies of deposits of the Productive strata of the northern oil and gas areas of the Baku archipelago. *Chinese Academy of Sciences. National Science Review. Oxford University Press*, 4 (2), 1281–1292.
- Reference**
- Akhmedov, A.M. (2008). On the geological characteristics and prospects of oil and gas content of the Umid area. *Azerbaijan Oil Industry*, 3, 19–22. [in Azerb.]
- Aliev, Ad.A., Guliev, I.S., Dadashov, F.N., Rakhmanov, R.R. (2015). Atlas mud volcanoes of the World. National Academy of Sciences of Azerbaijan. Institute of Geology and Geophysics. Baku: "Nafta-Press". [in Azerb.]
- Alikhanov, E.N. (1976). Oil and gas potential of the Caspian Sea. M: Nedra. [in Russian]
- Dortman, N.B. et al. (1976). Physical properties of rocks and minerals. M.: Nedra. [in Russian]
- Guliev, I.S., Kerimov, V.Yu., Osipov, A.V., Mustaev, R.N. (2017). Generation and accumulation of hydrocarbons in conditions of great depths of the earth's crust. *SOCAR Proceedings*, 1, 4–16. [in Azerb.]
- Gurbanov, V.Sh., Narimanov, N.R., Sultanov, L.A., Babaev, M.S. (2017). On the results of petrophysical studies of deposits of the Productive strata of the

northern oil and gas areas of the Baku archipelago. *Chinese Academy of Sciences. National Science Review. Oxford University Press*, 4 (2), 1281-1292.

Gurbanov, V.Sh., Sultanov, L.A., Narimanov, N.R., Babaev, M.S. (2016). Petrophysical features of the PT rocks of the Garasu field of the Baku archipelago under the conditions of the existing geodynamic regime. *Scientifik-Discussion. Praha*, 2 (2), 6-11. [in Czech.]

Ismail-zade et al. (1990). Atlas of oil and gas bearing and prospective structures of the Caspian Sea. Leningrad: NIGI.

Kerimov, A.A., Guseinov, G.M., Narimanov, N.R. (1995). Geodynamic aspects of manifestation of diapirism and mud volcanism. *Abstracts of the III international conference of the Azerbaijani community of oil geologists*, 4-5. [in Azerb.]

Khalilov, N.Yu. (2005). Prospects of oil and gas content of deep-water structures of the South Caspian: Apsheron, Umid, Babek. *Azerbaijan Geology*, 10, 8-21. [in Azerb.]

Mukhtarova, K.Z., Nasibova, G.J. (2019). On the productivity and petrophysical characteristics of the reservoir in the northern part of the Baku archipelago. *Web of Scholar. Multidisciplinary Scientific Journal*, 9 (39), 21-29. [in Poland]

Narimanov, N.R., Babaev, M.S., Rahimov, F.N. (2003). Features of the development of local uplifts in the northern part of the Baku archipelago. *Azerbaijan oil industry*, 2, 1-7. [in Azerb.]

Narimanov, N.R., Nasibova, G.D. (2016). Factors influencing the development of local uplifts and mud volcanoes of the Kur-Gabyrra, Shamakhy-Gobustan and Turkmen shelf depressions. *Theses of the thematic conference dedicated to the development of theories of academicians A. Alizade and Sh. Mehtiev "Education, migration and accumulation of hydrocarbons"*, 15. [in Azerb.]

Sokolov, B.A. (1985). Evolutionary-dynamic criteria for assessing the oil and gas content of the subsoil. M: Nedra. [in Russian]

Надійшла до редколегії 29.05.21

G. Nasibova, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
E-mail: gultar_nasibova_1@yahoo.com;
Kh. Mukhtarova, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
E-mail: mukhtarova.khuraman@mail.ru;
R. Narimanov, Master
E-mail: nariman.narimanov40@asoiu.edu.az;
Azerbaijan State Oil and Industry University,
34, Azadlig Ave., Baku, AZ1010, Azerbaijan

RESERVOIR PROPERTIES AND PROSPECTIVES OF LOWER PLIOCENE SEDIMENTS IN THE UMID AREA OF THE BAKU ARCHIPELAGO

The objective of this study is to investigate and analyze the reservoir properties of the Lower Pliocene sediments of the Baku Archipelago Umid area and its oil and gas potential.

One of the latest studies in the Umid area was geological assessment of reservoir parameters for calculation of hydrocarbon reserves. The earlier obtained results made it possible to more reliably calculate hydrocarbon reserves and plan prospecting and exploration works in the right direction. Large gas condensate reserves were identified in 2009 in horizons V and VII of the Productive Series (PS). Thus, well 10 produced 1.2 million m³/day of gas and 150 tons of condensate from the depth interval of 6340-6356m. Considering that hydrocarbon fields of the South Caspian depression (SCD) are, as a rule, multilayered, this is a reason to predict presence of hydrocarbon accumulations in deeper strata as well.

Variation patterns of reservoir properties, such as grain composition, carbonate content, porosity, permeability, density, propagation velocity of ultrasound waves in rocks were not comprehensively investigated in the previously conducted studies.

The article studies impact of the structural and tectonic properties of the Umid uplift of the SCD Baku archipelago upon formation of a mud volcano on the southeastern pericline subsidence. Taking into account impact of compressional stresses on the position of the fold vault and the crater of the mud volcano in connection with the syndepositional development of the uplift, a recommendation on the location of prospecting wells to deeper horizons is substantiated.

Formation of reservoir properties of rocks is a function of tectonic stresses arising in them. Occurrence of secondary reservoir properties in rocks is highly probable in tectonically active zones. There is a stable inverse relationship between reservoir properties, carbonate and clay content, and a direct one - with the degree of grain sorting that make up the rocks. The issues considered in the article indicate a high probability of presence of hydrocarbon accumulations here in deeper horizons of the sedimentary section.

In the future, based on our studies and geological and geophysical methods, it will be possible to thoroughly assess the prospects of deep-lying stratigraphic units of this area, and those identical to it.

Keywords: reservoir rock, density, porosity, permeability, carbonate content, rocks, reservoir properties.

Г. Насібова, канд. геол.-мінералог. наук, доц.,
E-mail: gultar_nasibova_1@yahoo.com;
Х. Мухтарова, канд. геол.-мінералог. наук, доц.,
E-mail: mukhtarova.khuraman@mail.ru;
Р.Н. Наріманов, магістр,
E-mail: nariman.narimanov40@asoiu.edu.az;
Азербайджанський державний університет нафти та промисловості,
пр. Азадліг, 34, м. Баку, AZE1010, Азербайджан

КОЛЕКТОРСЬКІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ВІДКЛАДІВ НИЖНЬОГО ПЛІОЦЕНУ ПЛОЩІ УМІД БАКІНСЬКОГО АРХІПЕЛАГУ

Метою дослідження є вивчення та аналіз колекторських властивостей відкладів нижнього пліоцену площі Умід Бакинського архіпелагу та перспективи її нафтогазоносності.

Одним з останніх досліджень на площі Умід є геологічна оцінка пластових параметрів для підрахунку запасів вуглеводнів. Раніше отримані результати дозволили достовірніше підрахувати запаси вуглеводнів та планувати пошуково-розвідувальні роботи у правильному напрямку. У 2009 році на V та VII горизонтах продуктивної товщі було виявлено поклади з великими запасами газоконденсату. Так, у св. № 10 на інтервалі глибин 6340–6356 м було отримано 1,2 млн м³/добу газу та 150 т конденсату. Враховуючи, що родовища вуглеводнів у Південнокаспійській западині (ПКЗ) є, як правило, багатоярусними, є підстави прогнозувати наявність вуглеводневих скопчень і в більш глибокозалягаючих товщах.

У проведених раніше дослідженнях комплексно не вивчалася закономірність зміни колекторських властивостей, таких як гранулометричний склад, карбонатність, пористість, проникність, щільність, швидкість поширення ультразвукових хвиль у породах. У нашій роботі вивчено вплив структурно-тектонічної характеристики підняття Умиду Бакинського архіпелагу ПКЗ на формування грязьового вулкана на південно-східному периклінальному зануренні. З урахуванням впливу стискаючих напруг на положення своду складки та кратера грязьового вулкана у зв'язку з конседиментаційним розвитком підняття, обґрунтовуються рекомендації про місце закладання пошукових свердловин для глибокозалягаючих горизонтів.

Формування колекторських властивостей порід залежить від тектонічних напруг, що у них виникають. У тектонічно активних зонах висока ймовірність виникнення у породах вторинних колекторських властивостей. Існує стійкий зворотний зв'язок між колекторськими властивостями, карбонатністю та глинистістю, прямий – зі ступенем відсортованості частинок, що складають породи.

Питання, що розглядаються, свідчать про високу ймовірність наявності тут вуглеводневих скопчень й у більш глибокозалягаючих горизонтах осадового розрізу. У майбутньому, ґрунтуючись на проведених нами дослідженнях та геолого-геофізичних методах, можна буде детально оцінити перспективи глибокозалягаючих стратиграфічних одиниць цієї площі, а також ідентичних їй площ.

Ключові слова: колектор, густина, пористість, проникність, карбонатність, породи, колекторські властивості.

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

551.71/.72 : 552.51(477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.08>

В. Покалюк, д-р геол. наук, доц.,

E-mail: pvskan@ukr.net,

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

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

Государственное учреждение "Институт геохимии окружающей среды НАН Украины",

пр. Палладина, 34а, г. Киев, 03142, Украина;

М. Коржнев, д-р геол.-минералог. наук, проф.,

E-mail: mnkorzhnev@gmail.com,

Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины,

бул. Чоколовский, 13, г. Киев, 03186, Украина

**ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ МЕТАПСЕФО-ПСАММИТОВЫХ АССОЦИАЦИЙ
УКРАИНСКОГО ЩИТА И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ
И МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫХ СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИЙ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)*

Петрохимическое сопоставление высокометаморфизованных конгломератовидных пород Украинского щита спорного возраста и генезиса (проблемные объекты) с эталонными слабометаморфизованными метапсефо-псаммитами палеопротерозоя Криворожского бассейна дает важный дополнительный материал для суждений об их исходной природе и вероятной коррелятивной стратиграфической позиции. Проблемные объекты на серии петрохимических диаграмм отчетливо разделяются на две отдельные группы. Первая группа включает псефо-псаммитовые кварциты Дибровского и Мариупольского участков Приазовья; петрохимически они соответствуют скелеватскому эталонному тренду/шлейфу – высокозрелому петрохимическому типу грубоотриггенных осадков нижней части палеопротерозоя. Вторая группа объединяет конгломератовидные гнейсы и кристаллосланцы Радомышльского участка тетеревской серии, окрестностей г. Первомайска и участка слияния рек Великая Вись, Горный Тикич, Гнилой Тикич, метапсефо-псаммиты Звенигородско-Шполянского участка, а также ингульские метапсаммо-алееритовые гнейсы. Эта группа хорошо коррелируется с глееватским эталонным трендом/шлейфом – незрелым субграувакково-граувакковым петрохимическим типом грубоотриггенных осадков верхов палеопротерозоя.

Ключевые слова: Украинский щит, протерозой, метапсефиты, метапсаммиты, петрохимия, стратиграфические корреляции.

Формулирование проблемы. Сама идея типизации метапсефитов на петрохимической основе может показаться маловероятной и непродуктивной по причине неоднородности состава обломков и соотношений между галечным материалом и заполнителем. Обобщающие работы на эту тему нам пока не известны, хотя отдельные попытки предпринимались (Кренделев, 1974). В.З. Негруца (Негруца, 1990) разделил все многообразие метаконгломератов Балтийского щита по степени мафичности-саличности на четыре формации: мафитовую, переходную (мафит-салическую), салическую и кварцевую. В то же время широко известны петрохимические классификации и диаграммы для псаммитовых пород А.Н. Неелова (1980), Ф. Петтиджона (Pettijohn, 1963, 1972), А.А. Предовского (1970, 1980), М. Хиррона (Herron, 1988), Х. Несбита и Дж. Янга (Nesbitt, Young, 1982), Я.Э. Юдовича (2000), Б. Роузера и Р. Корша (Roser, Korsch, 1986), Дж. Мейнарда (Maynard et al., 1982), М. Бхатии (Bhatia, 1983). Поскольку в грубообломочных породах между составом заполнителя и обломков существует теснейшая связь, полностью правомочно использование всех этих классификаций и диаграмм и при изучении собственно метаконгломератов, при этом химический состав заполнителя в большинстве случаев вполне адекватно отражает валовый химический состав пород. Общая проблема, затрагиваемая в данной статье, связана с развитием петрохимического направления в изучении грубообломочных терригенных пород; часть этой общей проблемы – использование петрохимических данных для генетических и иных реконструкций по отношению к метаморфизованным псефо-псаммитам докембрия.

Информация о химическом составе метапсефитов-метапсаммитов Украинского щита (УЩ) разрознена в

многочисленных публикациях (табл. 1), и сколько-нибудь значимых обобщений на сегодняшний день не имеется. Между тем типизация грубообломочных пород докембрия на петрохимической основе может иметь существенное значение для межрегиональных стратиграфических корреляций в раннем докембрии УЩ, а также для выяснения исходного генезиса спорных высокометаморфизованных (в амфиболитовой и гранулитовой фазах) конгломератовидных объектов, часто рассматриваемых в качестве тектоно-метаморфических образований. Возраст и стратиграфическая позиция таких спорных объектов до сих пор относятся к числу особо проблемных вопросов геологии УЩ.

Цель исследований. В статье сделана попытка обобщения и анализа петрохимических данных по грубообломочным метатерригенным сериям всего УЩ с целью установить (подтвердить или опровергнуть) исходно осадочную грубообломочную природу некоторых спорных конгломератовидных высокометаморфизованных объектов, а также обозначить их вероятную коррелятивную стратиграфическую позицию.

Методы и методология. Для петрохимической типизации и сопоставлений использованы методы многомерной статистики (кластерный и факторный анализы), а также разного рода двух-трех компонентные диаграммы. Весьма полезным и продуктивным при изучении химизма псефо-псаммитовых пород является серийный подход, когда анализируется вся совокупность взаимосвязанных гранулометрических парагенезисов грубокластических терригенных серий – конгломерат ↔ гравелит ↔ песчаник ↔ алевролит. Пелитовыми породами, как малозначимыми членами грубокластических серий, в данном случае можно

© Покалюк В., Коржнев М., 2022

пренебречь. Основным приемом, задействованным в работе, является петрохимическое сопоставление высокометаморфизованных конгломератовидных объектов спорного генезиса и возраста с хорошо изученными слабометаморфизованными типоморфными эталонами грубокластических серий мезоархей-палеопротерозоя Криворожской структурно-формационной зоны (КСФЗ).

Анализ предыдущих исследований. Ранее авторами (Коржнев, Покалюк, 2013; Покалюк, Сукач, 2015; Покалюк, 2017) на основании статистической обработки большого массива петрохимических данных (около 1000 полных силикатных анализов) по метаосадочным породам КСФЗ была осуществлена типизация метаосадочных петрохимических серий КСФЗ (рис. 1). Было установлено, что все метаседиментогенные образования КСФЗ (от мезоархей до верхов палеопротерозоя) принадлежат к двум петрохимическим сериальным типам: 1 – высокодифференцированному, протогумидному, кварцево (псефо-псаммит) → высокоглиноземному (пелит) → железисто-кремнистому (пелит-коллоидному); 2 – низкодифференцированному, промежуточному между гумидными и аридными сериями, граувакковому (псефо-псаммит-алевритовому). В архей-палеопротерозойском геологическом разрезе КСФЗ

происходит последовательная смена снизу вверх метаосадочных формаций первого сериального типа формациями второго типа. Это свидетельствует об эволюции климатических условий данного региона от протогумидных в архее и начале палеопротерозоя к субаридным в конце палеопротерозоя. Эта же схема подтверждается реконструкциями исходных минеральных парагенезисов пород по методу О.М. Розена "MINLITH" (Покалюк, Сукач, 2014). На основании петрохимических реконструкций был сделан важнейший вывод об эволюции условий гипергенеза для региона КСФЗ – интенсивность процессов химического выветривания (степень гидролиза) эволюционно снижалась от высокой степени в мезоархее до умеренно-высокой в начале палеопротерозоя и слабой в конце палеопротерозоя. Вполне очевидно, что указанная общая последовательность изменений степени гидролиза на водосборах в докембрии КСФЗ может быть принята и для всего УЩ. Эта последовательность имеет первостепенное значение для выяснения "степени зрелости" крупных литостратиграфических последовательностей, и, в частности – эволюции состава груботерригенных псефо-псаммитовых ассоциаций других регионов УЩ.

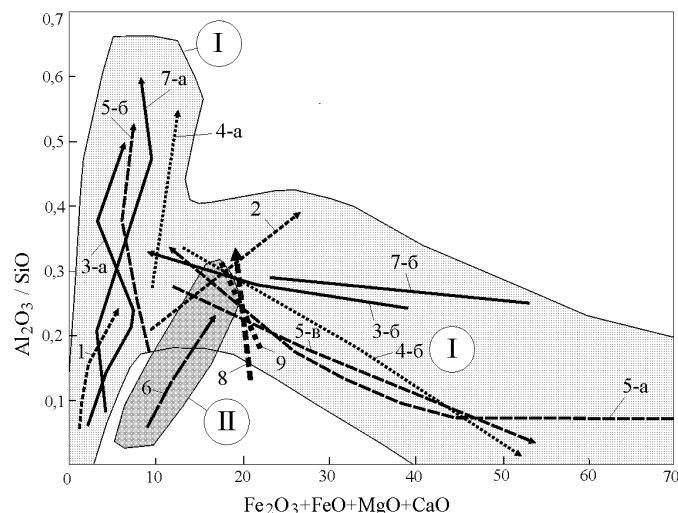


Рис. 1. Генерализованная схема дифференциации метаосадочных пород Криворожской СФЗ в координатах Al_2O_3/SiO_2 – $Fe_2O_3+FeO+MgO+CaO$ (Покалюк, 2017):

I, II – два главных типа петрохимических серий КСФЗ: I – высокодифференцированный сериальный тип, свойственный гумидному литогенезу, разделяющийся на две связанные ветви – кремнезем-высокоглиноземистую псефо-псаммо-пелитовую континентальную и карбонат-магнезиально-глиноземно-железистую пелитовую бассейновую (к этому типу относятся отложения латовской, скелеватской, саксаганской и гданцевской свит КСФЗ); II – низкодифференцированный граувакковый сериальный тип, промежуточный по своим петрохимическим параметрам между гумидными и аридными сериями фанерозоя, а также близкий к микститовым сериям зон активного тектоногенеза (к этому типу относятся отложения глееватской свиты). Тренды дифференциации: 1 – латовская толща (свита), высоkozрелые метапсефо-псаммиты; 2 – новокриворожская свита, вулканомитовые метапесчаники, песчаные сланцы; 3-а, 3-б – скелеватская свита: 3-а – главный тренд – высоkozрелые метапсефо-псаммо-пелиты, 3-б – второстепенный тренд – зрелые метаалевро-пелиты, связанные с размытием покровов ультрабазитов; 4-а, 4-б – саксаганская свита: 4-а – высоkozрелые метаалевро-пелиты, 4-б – кластогенно-хемогенные метапелит-коллоидные карбонат-магнезиально-глиноземно-железистые осадки; 5-а, 5-б, 5-в – гданцевская свита: 5-а – железисто-кластогенные зрелые метапсефо-псаммо-пелиты, связанные с размытием железистой формации саксаганской свиты, 5-б – высоkozрелые высокоглиноземистые метаалевро-пелиты, 5-в – кластогенные карбонат-магнезиально-железисто-глиноземистые метапелиты и кластогенно-хемогенные карбонат-магнезиально-глиноземно-железистые метапелит-коллоиды; 6 – глееватская свита – незрелые полимиктовые метапсефо-псаммо-алевриты; 7-а, 7-б – гумидные псаммо-алевро-пелиты мела Восточного Казахстана; 8 – аридные псаммо-алевро-пелиты неогена Ферганы; 9 – олистостромовые (микститовые) псаммо-пелитовые отложения мела Малого Кавказа

В качестве типоморфных слабометаморфизованных эталонов псефо-псаммитовых толщ, принадлежащих к вышеуказанным двум различным петрохимическим сериальным типам, мы будем здесь использовать отложения скелеватской и глееватской свит криворожского

палеопротерозойского разреза, как наиболее конгломератомехи, наиболее полно изученных, принадлежащих к разным этапам геотектонического развития и обладающих четкой индивидуальностью своих петрохимических признаков. Стратиграфическая позиция и относительный

возраст указанных свит определены вполне надежно – скелеватская свита фиксирует базальное основание разреза палеопротерозоя, в то время как глееватская свита – верхнюю часть разреза палеопротерозоя. Петрохимически груботерригенные отложения скелеватской и глееватской свит разительно отличаются друг от друга (Кулиш и др., 2007; Покалюк, Сукач, 2015) – их петрохимические тренды/шлейфы на диаграммах не совпадают и практически не перекрываются (рис. 1, 2). Они характеризуют два крупных исторических этапа развития региона с различным тектоническим режимом и палеогеографическими условиями литогенеза.

Метапсефо-псаммиты скелеватской свиты по своему химизму соответствуют/подобны платформенным континентальным высокозерлым терригенным сериям фанерозоя, сформированным в условиях умеренно гумидного климата с преобладающим каолин-гидрослюдистым профилем выветривания. Они относятся к низконариевым и высококалиевым породам, что типично для континентальных псаммитов. Кроме того, большинство имеет низкие содержания кальция и пониженную фемичность. Они отвечают петрохимическим типам (по Ф. Петтиджону и М. Хиррону): от кварцевых аренитов до субаркозов, соответствуя монокварцевым и олигомиктовым кластолитам. В отличие от отложений скелеватской свиты метапсефо-псаммиты глееватской свиты характеризуются значительно большей фемичностью, более высокими содержаниями кальция и натрия. Петрохимически они

соответствуют субграувакково-граувакковым бассейновым ассоциациям пород, сформированным в пределах областей с относительно активным тектоническим режимом (рециклированный континентальный ороген) и семи-гумидными-семиаридными климатическими условиями.

Учитывая установленные кардинальные различия в химизме метапсефо-псаммитов указанных свит, мы можем использовать их в качестве руководящих или отправных эталонов при сопоставлении с другими метапсефо-псаммитовыми ассоциациями УЩ, в том числе и высокометаморфизованными. Установленная направленность эволюции условий гипергенеза на протяжении мезоархей-палеопротерозоя КСФЗ открывает, в свою очередь, дополнительные возможности для межрегиональных стратиграфических корреляций на петрохимической основе в пределах всего УЩ.

Фактический материал. Собрана и проанализирована выборка из опубликованных и неопубликованных источников 451 полных силикатных анализов метапсефо-псаммитовых пород УЩ (табл. 1, рис. 2), в том числе проблемных высокометаморфизованных пород спорного генезиса и возраста (конгломератовидных и псаммовидных пород с гнейсовым и кристаллосланцевым матриксом). Главный объем выборки составили анализы валовых проб, а также анализы, характеризующие заполнитель/цемент пород. Анализы по отдельным галькам исключались.

Таблица 1

Распределение выборки использованных полных силикатных анализов метапсефо-псаммитов по отдельным псефитоносным объектам/стратонам УЩ

Псефитоносные объекты / стратоны УЩ	Кол-во анализов метапсефо-псаммитов	Источник
Латовская свита КСФЗ, метапсефо-псаммитовые кварциты	44	В.В. Покалюк, 2015, 2017
Скелеватская свита КСФЗ, метапсефо-псаммиты	86	Е.А. Кулиш, В.В. Покалюк, В.Г. Яценко, 2007; В.В. Покалюк, 2015, 2017
Глееватская свита КСФЗ, метапсефо-псаммиты	192	В.В. Покалюк, 2015, 2017. В.В. Покалюк, В.В. Сукач, 2015
Радомышльский участок, тетеревская серия, конгломератовидные породы	10	А.И. Стрыгин, В.Н. Кобзарь, Л.Р. Казаков, 1964; Г.М. Яценко, В.П. Кирилюк, А.А. Сиворонов, 1971; В.С. Сукач, О.С. Иванушко, 1977; Л.В. Шумлянский, 2012
Звенигородско-Шполянский участок, метапсефо-псаммиты	16	А.И. Стрыгин, В.Н. Кобзарь, 1962, 1967; Е.М. Лазыко и др., 1975; В.Н. Кобзарь, 1981
Ингульские метапсаммо-алевритовые гнейсы	13	В.Н. Кобзарь, 1981
Участок слияния рек Великая Высь, Гнилой Тикич, Горный Тикич, конгломератовидные породы	4	В.Н. Кобзарь, Е.М. Гониондский, 1977
Окрестности г. Первомайска (Побужье), конгломератовидные породы	42	Г.М. Яценко, 1980; В.Н. Кобзарь, Е.М. Гониондский, 1977; А.И. Стрыгин, В.Н. Кобзарь, 1967; В.В. Закруткин (рукопись до 2001 года)
Фрунзовская магнитная аномалия, Южное Побужье, метапсефо-псаммиты	9	А.В. Вайло, 1994
Северное Приазовье, нижнедзюльговская свита, метапсефо-псаммитовые кварциты	24	В.А. Семка и др., 2010
Западное Приазовье, Сорокинская структура, крутобалковская свита, метапсефо-псаммиты	1	Г.В. Артеменко, 1997
Центральное Приазовье, Мариупольский участок, метапсаммитовые кварциты	10	В.В. Закруткин, Е.А. Кулиш и др., 1990
Итого: 451		

Полученные результаты и их обсуждение. Результаты петрохимических сопоставлений проиллюстрированы на диаграммах рис. 2. Выбор диаграмм

продиктован общим характером факторной изменчивости выборки, а также известными классификационными диаграммами для песчаных пород.

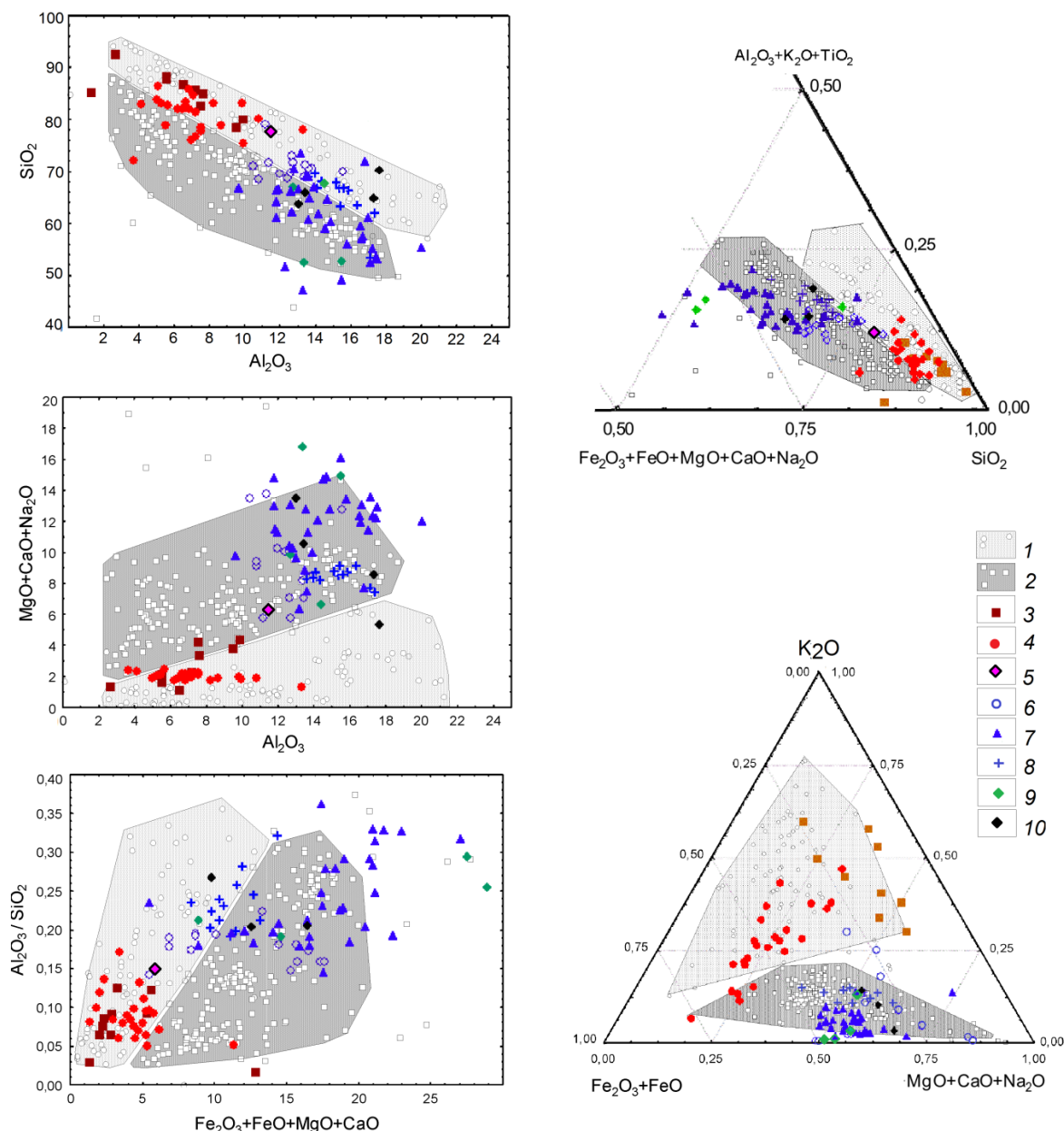


Рис. 2. Сопоставление химического состава высокометаморфизованных конгломератовидных пород УЩ со слабометаморфизованными груботерригенными осадками скелеватской и глееватской свит палеопротерозойского разреза Криворожской структуры:

- 1 – высоkozрелый шлейф груботерригенных (псефиты-псаммиты-алевриты) метаосадков скелеватской свиты;
- 2 – незрелый субграувакково-граувакковый шлейф груботерригенных (псефиты-псаммиты-алевриты) метаосадков глееватской свиты;
- 3 – метасаммитовые кварциты Мариупольского участка Центрального Приазовья;
- 4 – метасефо-псаммитовые кварциты нижнедзюбовской свиты Северного Приазовья;
- 5 – метаконгломерат (биотитовый плагиогнейс с галькой кварца) Сорокинской зеленокаменной структуры, р. Берда, устье б. Собачья, крутобалковская свита;
- 6 – метасефо-псаммиты Звенигородско-Шполянського участка; конгломератовидные породы (пироксен-плагиоклазовые гнейсы и кристаллосланцы) окрестностей г. Первомайська (Побужье);
- 8 – ингульские гнейсы метасаммо-алевритовые;
- 9 – конгломератовидные породы (плагиогнейсы и кристаллосланцы) участка слияния рек Великая Вись, Горный Тикич, Гнилой Тикич;
- 10 – конгломератовидные породы (плагиогнейсы и кристаллосланцы) тетеревской серии Радомышльського участка

В частности, диаграмма $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ показывает общий "размах" дифференциации по наиболее изменчивым компонентам для псаммитовых пород – кремнезему и глинозему. Она хорошо отражает гранулометрическую дискретность осадков: со снижением SiO_2 и увеличением Al_2O_3 происходит уменьшение размерности псаммитов и увеличение доли глинистой компоненты.

Диаграмма в координатах $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ – $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{CaO}$ является упрощенным вариантом

(в вес. %) диаграммы А.Н. Неелова (1980) и характеризует дифференциацию по двум определяющим для терригенных пород факторам: алюмо-кремниевому модулю и общей фемичности. Алюмо-кремниевый модуль показывает соотношение между кластической кварца и глинистой компонентой и четко коррелирует с гранулометрическим составом пород; общая фемичность связана со степенью "зрелости" осадков – количеством неразложенных или слабо разложенных плагиоклазов и темноцветов.

Диаграмма $Al_2O_3 - MgO + CaO + Na_2O$ в какой-то мере представляет модификацию диаграммы А.Н. Неелова, где вместо алюмо-кремниевого модуля используется только глинозем, а из фактора общей фемичности убрано железо, но добавлен Na_2O ; в таком варианте диаграмма лучше отражает количество неразложившейся плагиоклазовой кластики ("аркозо-вакковость") и карбонатистость осадков.

Трехкомпонентная диаграмма $SiO_2 - Al_2O_3 + K_2O + TiO_2 - Fe_2O_3 + FeO + MgO + CaO$ отражает соотношение главных факторов дифференциации выборки (факторный анализ, метод главных компонент).

Трехкомпонентная диаграмма $K_2O - MgO + CaO + Na_2O - Fe_2O_3 + FeO$ характеризует степень "зрелости" бескварцевого остатка псефо-псаммитовых пород. Благодаря исключению кремнезема и глинозема диаграмма позволяет сопоставлять "зрелость" бескварцевого остатка для кластолитов разного гранулометрического состава и с разным содержанием глинистой компоненты. Степень "зрелости" пород увеличивается по направлению от угла $MgO + CaO + Na_2O$ к стороне $K_2O - Fe_2O_3 + FeO$. Разделение "зрелых" кластолитов по калию и железу отражает природный процесс разделения высокоглиноземистых пелитов на более и менее железистые.

Фигуративные точки анализов сопоставляемых проблемных объектов на серии петрохимических диаграмм вполне отчетливо разделяются на две отдельные группы (облака рассеяния), которые хорошо вписываются в различные эталонные области/шлейфы метаосадков КСФЗ (рис. 2). К первой группе относятся метапсефо-псаммиты Дибровского и Мариупольского участков Приазовья; они соответствуют скелеватскому эталонному шлейфу (светло-серый шлейф на диаграммах) – высокозрелому петрохимическому типу грубоэригенных осадков. Вторая группа объединяет конгломератовидные породы (с гнейсовым или кристаллосланцевым заполнителем/цементом) Радомышльского участка тетеревской серии, окрестностей г. Первомайска и участка слияния рек Великая Высь, Горный Тикич, Гнилой Тикич, метапсефо-псаммиты Звенигородско-Шполянского участка, а также ингульские метасаммо-алевритовые гнейсы. Эта группа хорошо коррелируется с глееватским эталонным шлейфом (темно-серый шлейф на диаграммах) – незрелым субграувакк-граувакковым петрохимическим типом грубоэригенных осадков. Единичный анализ метапсефо-псаммита Сорокинской зеленокаменной структуры занимает промежуточное положение, тяготея все же к скелеватскому эталонному типу.

Выводы. Все разнообразие метаморфизованных грубоэригенных осадков УЩ сводится к двум петрохимическим (и петрогенетическим) ассоциациям/сериям – высокозрелой олигомиктово-монокварцевой и незрелой субграувакк-граувакковой, которые хорошо коррелируются с эталонными слабометаморфизованными грубоэригенными ассоциациями разреза палеопротерозоя Криворожской СФЗ – скелеватской и глееватской свитами.

Использование петрохимических сопоставлений дает нам очень важный дополнительный материал для суждений об исходной природе высокометаморфизованных конгломератовидных пород спорного генезиса и их вероятной коррелятивной стратиграфической позиции:

1. Все изученные высокометаморфизованные конгломератовидные породы спорного генезиса, а именно: Радомышльского участка тетеревской серии, окрестностей г. Первомайска, участка слияния рек Великая Высь,

Горный Тикич, Гнилой Тикич, участков Приазовья – Мариупольского, Крутобалкинского и Дибровского, – по своим петрохимическим особенностям (соотношениям петрогенных компонентов) вполне соответствуют первично осадочным грубоэригенным породам; они хорошо вписываются в эталонные для палеопротерозоя КСФЗ тренды/шлейфы/ассоциации метапсефо-псаммитов.

2. Петрохимически подтверждаются представления авторов о вероятной коррелятивной позиции спорных метапсефито-псаммитовых объектов УЩ, основанные ранее на литолого-петрографических, структурно-тектонических, стратиграфических и формационных признаках: 1) метакластогенные образования Приазовского мегаблока (Дибровского и Мариупольского участков) соответствуют высокозрелому петрохимическому типу/шлейфу/тренду грубоэригенных осадков (скелеватскому) и могут быть рассмотрены как относящиеся к соответствующему стратиграфическому уровню, то есть к низам палеопротерозоя; 2) метапсефито-псаммитовые объекты западной половины УЩ – Радомышльского участка тетеревской серии, Звенигородско-Шполянское участка Приингуля, участка слияния рек Великая Высь, Горный Тикич, Гнилой Тикич, а также окрестностей г. Первомайска – хорошо коррелируются с незрелым субграувакк-граувакковым петрохимическим типом/шлейфом/трендом осадков (глееватским) и могут быть отнесены к соответствующему стратиграфическому уровню, то есть к верхам палеопротерозоя.

3. Дальнейшее развитие литохимических исследований связано с получением более полных данных по целому ряду геологических структур и стратиграфических подразделений докембрия УЩ, а также вовлечением в сферу литохимических исследований количественных определений в породах ряда индикаторных малых элементов.

Список использованных источников

- Коржнев, М.Н., Покалюк, В.В. (2013). Метаосадочные петрохимические серии – критерий палеоклиматических реконструкций в раннем докембрии Криворожско-Кременчугской структурно-формационной зоны Украинского щита. *Доповіді НАН України*, 8, 120-127.
- Кренделев, Ф.П. (1974). Металлоносные конгломераты мира. Новосибирск: Наука.
- Кулиш, Е.А., Покалюк, В.В., Яценко, В.Г. (2007). Петрохимия раннепротерозойских метакластолитов нижней свиты Кривбасса в связи с условиями их седиментации. Киев: Логос.
- Негруца, В.З. (1990). Докембрийская формация кварцевых конгломератов Балтийского щита. Апатиты.
- Покалюк, В.В. (2017). Литогенез в раннем докембрии Криворожского железорудного бассейна. LAP LAMBERT Academic Publishing: (ISBN 978-3-330-32486-6).
- Покалюк, В.В., Сукач, В.В. (2015). Литохимия метакластогенных осадков верхов палеопротерозоя Криворожского железорудного бассейна в аспекте палеогеографических и палеотектонических условий формирования. *Науковий вісник національного гірничого університету*, 2, 14-23.
- Покалюк, В.В., Сукач В.В. (2014). Седиментогенез в раннем докембрии Криворожского железорудного бассейна: Литохимические типы и MINLITH-нормативный состав метаосадков. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 6, 5–14.

References

- Korzhnev, M.N., Pokalyuk, V.V. (2013). Meta-sedimentary petrochemical series – a criterion for paleoclimatic reconstructions in the Early Precambrian of the Krivoy Rog-Kremenchug structural-formational zone of the Ukrainian Shield. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 8, 120-127. [in Russian]
- Krendeliev, F.P. (1974). Metal-bearing conglomerates of the world. Novosibirsk: Nauka. [in Russian]
- Kulish, E.A., Pokalyuk, V.V., Yatsenko, V.G. (2007). Petrochemistry of the Early Proterozoic metaclastolites of the Lower suite of Kryvbas in connection with their sedimentation conditions. Kiev: Logos. [in Russian]
- Negruța, V.Z. (1990). Precambrian Formation of quartz conglomerates of the Baltic Shield. Apatity. [in Russian]
- Pokalyuk, V.V. (2017). Lithogenesis in the Early Precambrian of the Krivoy Rog iron ore basin. LAP LAMBERT Academic Publishing: (ISBN 978-3-330-32486-6). [in Russian]

Pokalyuk, V.V., Sukach, V.V. (2015). *Lithochemistry* of metaclastogenic sediments of upper paleoproterozoic of Krivoy Rog iron ore basin on aspects of paleogeographic and paleotectonic formation conditions. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 14-23. [in Russian]

Pokalyuk, V.V., Sukach, V.V. (2014). *Early Precambrian sedimentogenesis* of Krivoy Rog iron-ore basin: Lithochemical types and MINLITH-standart mineral composition of metasediments. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 5-14. [in Russian]

Надійшла до редколегії 26.08.21

V. Pokalyuk, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: pvskan@ukr.net,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
State Institution "The Institut of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine",
34a Ac. Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine;
M. Korzhnev, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
E-mail: mnkorzhnev@gmail.com,
Institute of telecommunications and global information space of National Academy of Sciences of Ukraine,
13 Choculovsky Ave., Kyiv, 03186, Ukraine

PETROCHEMICAL TYPIZATION OF METAPSEFITES-METAPSAMMITES OF THE UKRAINIAN SHIELD AND ITS SIGNIFICANCE FOR LITHOGENETIC RECONSTRUCTIONS AND INTER-REGIONAL STRATIGRAPHIC CORRELATIONS

Petrochemical comparison of highly metamorphosed conglomerate-like rocks of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield of questionable age and genesis (problem objects) with reference weakly metamorphosed metapsephites-metapsammites of the Paleoproterozoic of the Kryvyi Rih basin provides important additional material for judging the initial nature of highly metamorphosed objects and their probable correlative stratigraphic position. Problem objects on a series of petrochemical diagrams are clearly divided into two separate groups. The first group includes psephite-psammitite-like quartzites of the Dibrovsky and Mariupol areas of the Azov Region; petrochemically, they correspond to the Skelevatian reference trend – a highly mature petrochemical type of coarse terrigenous sediments of the lower part of the Paleoproterozoic. The second group unites conglomerate-like gneisses and crystalline schists of the Radomyshl area of the Teterivska Group, of the vicinity of Pervomaisk and the confluence of the Velyka Vys, Hirskyi Tikych, Hnylyi Tikych rivers, metapsephites-metapsammites of the Zvenigorod-Shpolyansk area, as well as Ingul metapsammitous-metalevritous gneisses. This group is in good agreement with the Gleyevat reference trend, an immature sub-greywacke petrochemical type of sediments of the upper Paleoproterozoic.

Keywords: Ukrainian shield, Proterozoic, metapsephites, metapsammites, petrochemistry, stratigraphic correlations.

В. Покалюк, д-р геол. наук, доц.,
E-mail: pvskan@ukr.net,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
Державна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України",
пр-т Палладіна, 34а, м. Київ, 03142, Україна;
М. Коржнев, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,
E-mail: mnkorzhnev@gmail.com,
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України,
бул. Чоколівський, 13, м. Київ, 03186, Україна

ПЕТРОХІМІЧНА ТИПІЗАЦІЯ МЕТАПСЕФО-ПСАМІТОВИХ АСОЦІАЦІЙ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА ТА ЇЇ ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ЛІТОГЕНЕТИЧНИХ РЕКОНСТРУКЦІЙ І МІЖРЕГІОНАЛЬНИХ СТРАТИГРАФІЧНИХ КОРЕЛЯЦІЙ

Петрохімічне зіставлення високометаморфізованих конгломератовидних порід Українського щита спірного віку і генезису (проблемні об'єкти) з еталонними слабометаморфізованими метапсефо-псамітами палеопротерозою Криворізького басейну дає важливий додатковий матеріал для суджень про їхню вихідну природу й імовірну корелятивну стратиграфічну позицію. Проблемні об'єкти на серії петрохімічних діаграм чітко поділяються на дві окремі групи. Перша група включає псефо-псамітоподібні кварцити Дібрівської і Маріупольської ділянок Приазов'я; петрохімічно вони відповідають скелюватському еталонному тренду/шлейфу – високозрілому петрохімічному типу груботеригенних відкладів нижньої частини палеопротерозою. Друга група об'єднує конгломератоподібні гнейси і кристалосланці Радомішльської ділянки тетерівської серії, околиць м. Первомайська, ділянки злиття річок Велика Вись, Гірський Тікич, Гнилий Тікич, метапсефо-псаміти Звенигородсько-Шполянської ділянки, а також Ігульські метапсамо-алеєвритові гнейси. Ця група добре кореспондується з глеюватським еталонним трендом/шлейфом – незрілим субграувакково-граувакковим петрохімічним типом відкладів верхів палеопротерозою.

Ключові слова: Український щит, протерозой, метапсефіти, метапсаміти, петрохімія, стратиграфічні кореляції.

УДК 553.3.071

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.09>

Н. Бабаев, проф., д-р геол.-минералог. наук,
E-mail: nibabayev@yandex.ru;
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Пр. Свободы, 20, Баку, AZ1010, Азербайджан

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РЕДКИХ И РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СОПОЧНЫХ БРЕКЧИЯХ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ АЗЕРБАЙДЖАНА (АБШЕРОНСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, ГОБУСТАН)

(Представлено членом редакционной коллегии д-ром геол. наук, доц. С.С. Шнюковым)

На основании современных полевых и лабораторных исследований описаны условия накопления некоторых редких и рассеянных элементов в сопочных брекчиях, на примере наиболее характерных грязевых вулканов Абшерона и Гобустана.

Определена типоморфная геохимическая ассоциация с борной минерализацией редких и рассеянных элементов в твердых продуктах извержения грязевых вулканов. Выявлено, что грязевулканизм является благоприятным фактором для накопления бора, лития, цезия и стронция в сопочных брекчиях в практически интересных значениях. Максимальные значения этих концентраций отмечены в сопочных брекчиях свежего извержения с остатками водноилистой грязи.

Дисперсия выборки, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации являются наиболее контролирующими параметрами функций распределения исследуемых элементов в сопочных брекчиях. По оценкам этих параметров выяснилось, что бор, литий и цезий обнаруживают значительный привнос в ходе грязевулканических новообразований, а рубидий нет.

Установленные средние значения концентрации бора (0,216 кг/т), лития (55 г/т), рубидия (132 г/т) и цезия (50 г/т) могут быть рассмотрены как первые количественные параметры геохимической специализации грязевулканических продуктов извержения на примере Абшеронского полуострова и Гобустана. Эти параметры могут быть использованы для уточнения так называемых провинциальных кларков геохимического районирования, прогноза поисков бора и редких щелочей, а также решения других задач.

Ключевые слова: грязевой вулкан, брекчия, редкие элементы, минерализация, кларк, концентрация, бура, щелочные элементы, спектральный анализ.

Цель работы. Возникает необходимость научного обоснования возможности использования грязевулканических продуктов в виде сопочных брекчий, водноилистой грязи в качестве сырья для получения промышленных концентраций бора и сопутствующих ему редких щелочных элементов. При этом важно выяснение литологических и минерало-геохимических условий накопления бора и редких щелочей в грязевулканических образованиях, широко развитых в Азербайджане.

В этой связи большое значение приобретают вопросы количественного и качественного распределения бора и редких щелочей в сопочных брекчиях, на основе чего могут быть установлены геохимические особенности поведения этих элементов. Сюда также входит изучение элементного состава геохимической ассоциации, типоморфной для борной минерализации в грязевулканическом процессе. Установленные при этом особенности поведения бора и других элементов в процессе грязевулканизма, выявленные на примере грязевых вулканов Гобустана и Абшеронского полуострова, могут быть применены и для изучения подобных образований в других регионах СНГ.

В ходе выполнения настоящей работы ставились и решались следующие задачи:

- установление уровней концентраций бора и редких щелочей в различных литофациях грязевулканического извержения во времени и пространстве;
- изучение элементного состава геохимической ассоциации, типоморфной для борной минерализации в сопочных брекчиях грязевых вулканов;
- выявление количественных параметров распределения бора и сопутствующих ему элементов в твердых продуктах извержений, с применением математической статистики;
- определение формы миграции редких элементов в грязевых вулканах с учетом гранулометрического и минерального состава;
- разработка геохимических критериев прогнозирования поисков искоемых элементов в сопочных брекчиях грязевых вулканов.

Введение. Самые крупные грязевые вулканы не только Азербайджана, но и всего мира находятся в Гобустане (*Largest mud volcano, 2004*). В периоды пароксизмов они выбрасывают на дневную поверхность внушительные объемы грязевулканической брекчий, состоящие из обломков различных по литологическому составу и возрасту горных пород.

Не затрагивая геохимических особенностей органического вещества, обильное присутствие которого свидетельствует об скоплениях углеводородов в недрах, отметим, что литолого-петрографический анализ кластического материала и цементирующей массы брекчий показывает присутствие в них как грубообломочных, так и более измельченных карбонатных пород. При этом преобладают песчано-алевритовые фации палеоцен-миоценового возраста.

В результате исследований, проведенных несколькими поколениями специалистов, в брекчиях грязевых вулканов установлено около 80 минералов различных классов: сульфид, окисел, силикат, карбонат, фосфат, борат, сульфат, галоидов и нитратов. Как правило, все минералы объединяют в три группы:

1. Реликтовые (унаследованные) из вмещающих вулканы осадочных пород;
2. Образованные в процессе грязевого вулканизма;
3. Производимые термальным метаморфизмом (высокими температурами горевших газов при извержениях) (*Бабаев, 2016*).

Во всех вышеназванных группах довольно часто встречаются редкие и рассеянные элементы. Кроме того, в брекчиях грязевых вулканов присутствуют более 30 микроэлементов. Это в основном элементы группы железа (Fe, Ni, Cr, V, Co, Ti), полиметаллических руд (Cu, Pb, Zn) и др. (*Бабаев, 2018*). Все эти элементы в брекчиях вулканов имеют повышенные концентрации, значительно превышающие их кларковые значения. Интервал содержания редких и рассеянных элементов для комплексов осадочных пород, вмещающих в себе грязевые вулканы, известен и не превышает фоновые значения области.

© Бабаев Н., 2022

Высокие, часто промышленно-интересные концентрации указанных элементов в продуктах грязевых вулканов могут быть связаны либо со спецификой самого грязевулканического процесса, либо с привносом глубинного материала по имеющимся разломам, сопровождающих все, без исключения, грязевые вулканы.

Результаты исследований. Ниже приводится краткое описание сведений о характерных вулканах Абшеронского полуострова (Шонгарская группа) и Гобустана.

Шонгарская группа грязевых вулканов включает в себя вулканы Шонгар, Сарынча и Гюльбахт, расположенные в направлении с юго-востока на северо-запад в порядке их перечисления. Все они входят в Шонгарский нефтеносный участок, представляющий собой долину, вдоль которой и размещены указанные грязевые вулканы. Абсолютные отметки вулканов Шонгар – 109 м, Сарынча – 158 м и Гюльбахт – 100 м (Бабаев, 2019).

В геологическом строении площади расположения этих вулканов принимают участие преимущественно отложения абшеронского и акчагыльского ярусов, диатомовой свиты и майкопа. Древнекаспийские, в основном, ракушечные известняки большей частью прикрыты наносами и, отчасти, сопочными брекчиями. Указанные отложения слагают соответственно крылья и сводовые части брахиантиклиналей, широко развитых в регионе.

Распределение борного ангидрида и окисей редких щелочей в сопочных брекчиях этих грязевых вулканов приведены в табл. 1. Во вмещающих вулканы коренных породах продуктивной толщи, преимущественно глинистого и песчано-глинистого составов, содержание борного ангидрида не превышает 400 г/т, окисей лития 80 г/т, рубидия 70 г/т и цезия 10 г/т. Всюду повышенные концентрации этих элементов наблюдаются в брекчиях свежего излияния.

Таблица 1

Содержание борного ангидрида, окисей лития, рубидия и цезия в сопочных брекчиях грязевых вулканов Гюльбахт-Сарынча-Шонгар

Характеристика опробуемого материала	B ₂ O ₃ , в%	Li ₂ O, в%	Rb ₂ O, в%	Cs ₂ O, в%
Песчаные глины	0,04	0,008	0,007	-
Глина	0,05	0,009	0,008	0,002
То же с гипсом	0,04	0,01	0,008	0,004
То же	0,06	0,01	0,009	0,005
Песчаники с гипсом	0,07	0,015	0,01	0,005
То же	0,06	0,010	0,009	0,004
То же без гипса	0,05	0,010	0,01	0,005
То же	0,08	0,015	0,01	0,006
То же	0,09	0,013	0,011	0,007
То же с гипсом, налетами солей и нефти	0,006	0,015	0,012	0,008
То же	0,10	0,013	0,01	0,01
То же	0,12	0,014	0,011	0,009
То же, обломки брекчий	0,15	0,018	0,014	0,01
То же	0,25	0,02	0,018	0,015
То же	0,20	0,02	0,019	0,010

На основании анализа 60 образцов, отобранных из сопочных брекчий трех вулканов, составлена табл. 2. В таблице даны интервалы содержания лития, рубидия и цезия. Среднее содержание лития, составляет 66,3 г/т, рубидия – 170,3 г/т и цезия – 61 г/т, с коэффициентами концентрации 1,0; 0,88 и 5,6 соответственно. Только эти данные в самом первом приближении указывают на некоторое накопление лития и цезия в процессе грязевулканизма Гюльбахт, Сарынча и Шонгар. В этих условиях рубидий заметно выносятся. Максимальное содержание лития 82 г/т, рубидия – 260 г/т и цезия – 125 г/т приходится на брекчии свежего излияния. В результате проведенной нами работы установлена не только благоприятная роль грязевулканического процесса в накоплении бора и редких щелочных элементов в сопочных брекчиях вулкана, но и определенные закономерности в распределении их по фациям, возрасту комплекса пород, а также по характеру извержений. Стало известным, что максимальные содержания бора и редких щелочных элементов приурочены к глинистой и песчано-алевритовой фациям более поздних извержений вулканов. Карбонатная фация характеризуется самым высоким содержанием Sr (до 0,3%) и Mn (1 %). В песчано-глинистых составляющих брекчий установлены повышенные концентрации V, Ni, Cu, Ba, а сопочный шлам обычно содержит еще и очень высокие содержания Co, Mo, Zn (Дубенский, 2018; Холодов, 2012).

Во всех 95 геохимических образцах, отобранных из брекчий грязевых вулканов Гобустана, отмечены

необычно высокие для коренных осадочных пород области содержания микроэлементов (табл. 3).

Благодаря проведенным радиометрическим измерениям состава брекчий грязевых вулканов выявлены некоторые закономерности распределения в них радиоактивных элементов. Наиболее радиоактивными оказались глинистые компоненты брекчий олигоцен-миоценового возраста (до $8 \times 10^{-5}\%$) (Дубенский, 2018).

Более четкая корреляция прослеживается между радиоактивными элементами и органическим веществом (битумами) в твердых продуктах грязевых вулканов Солахай, Гегерчин, Бахар (Гобустан). По нашему мнению, определяющими в распределении редких элементов в Гобустане, наряду с тектоно-геологическим строением, являются фациальные фазы накопления осадков в различные эпохи, а также характер материала, сносимого из областей сноса. В пределах одной области сноса наблюдается закономерное изменение содержания различных элементов от пресноводных отложений к морским (например, концентрация бора возрастает). Устанавливается парагенетическая связь некоторых элементов (в частности элементы группы железа) в молассах, аллювиальных озерных и разнофациальных морских отложениях. Наличие твердых продуктов извержений вулканов в разрезе осадочных толщ существенно влияет на процентное соотношение химических элементов и на их фоновое значение. В совокупности такое обстоятельство позволит судить как о палеогеографии, так и о характеристике палеобассейна (глубина,

соленость, температура, органический мир) (Собисевич и др., 2014; Шнюков, 2013).

На наш взгляд, в образовании минеральных форм, свойственных грязевулканическому процессу, особую роль играют водные растворы. Исключая генетическую связь грязевых вулканов с магматогенными, мы не можем исключить возможность поступления в канал грязевых вулканов глубинных вод, поступающие в верхние слои земной коры по тектоническим разломам и трещинам. Поэтому наличие в продуктах извержений грязевых вулканов таких гипогенных элементов, как Hg, Co, Ni, Ti и др. в повышенных концентрациях, вполне объяснимы. Среди физико-химических параметров, определяющих своеобразие водных растворов в гипергенной зоне, наибольшее значение имеют окислительно-восстановительные и щелочно-кислотные условия. Установлено, что в связи с образованием нерастворимых сульфидов, восстановительно-сероводородная обстановка неблагоприятна для миграции многих металлов. При этом, как и все подземные воды, воды грязевых вулканов содержат CO₂, а также растворимые органические соединения. Обычно, самые распространенные элементы грязевых вулканов – железо и марганец в этих условиях находятся в восстановительном состоянии и ведут себя как двухвалентные металлы (Fe²⁺, Mn²⁺) (Newton, 1980).

Как правило, элементы, образующие катионы (Fe, Cu, Ni, Co и др.), легко мигрируют в кислых водах и слабее в щелочных. Элементы, образующие анионы, напротив, лучше мигрируют в щелочных водах. Это в

основном не металлы. Но есть элементы, образующие очень легко растворимые соединения, подвижные в водах любого состава (Na, Cl, F, и др.)

Сильнокислотные воды (pH<3) вызывают окисление пирита и других дисульфидов, элементарной серы и приводит к образованию свободной серной кислоты. В таких водах наблюдается интенсивная миграция Fe, Al, Cu, Zn и т.д. Этот тип воды в грязевых вулканах редок (вулканы Уталыги, Гырдаг).

В слабокислых водах легко мигрируют металлы в форме бикарбонатов и комплексных соединений с органическими кислотами (вулканы Арзани, Дурандаг).

Самые распространенные в грязевых вулканах слабощелочные (pH 6,5-7,5) и щелочные (pH 7,5-8,5) воды менее благоприятны для миграции большинства металлов, которые, как правило, осаждаются в форме нерастворимых гидроокислов и карбонатов (вулкан Айратекан). Аниогенные элементы (Ge, V и др.), напротив, мигрируют легко. Такие элементы, как Ca, Sr, Ba, почти не мигрируют в этих условиях и дольше находятся в диссоциационном состоянии в растворе. Особенностью этих вод является то, что некоторые металлы в них ведут себя как аниогенные элементы (Cu, Al), а такой распространенный элемент, как бор, входит в состав различных подвижных анионов и образует собственные минеральные формы в виде буры (Na₂B₄O₇ · 10H₂O) и улексита (Na, Ca, B₅O₉ · 8H₂O) во многих грязевых вулканах Гобустана.

Таблица 2

Распределения лития, рубидия и цезия в сопочных брекчиях грязевых вулканов Гюлбахт-Сарынча-Шонгар

Опробируемый материал	Литий					Рубидий					Цезий				
	Количество определений по интервалам содержания в г/т			Среднее содержание в г/т	Коэффициент концентрации	Количество определений по интервалам содержания в г/т			Среднее содержание в г/т	Коэффициент концентрации	Количество определений по интервалам содержания в г/т			Среднее содержание в г/т	Коэффициент концентрации
	5-50	50-100	100-150			10-100	100-200	200-300			5-50	50-100	100-150		
Сопоч. бр. песано-глинистого состава древнего извержения	15	4	2	55	0,9	8	4	2	110	0,59	13	2	–	22	1,8
То же с гипсом	4	16	1	62	1,0	2	9	3	150	0,75	15	4	–	36	3,0
То же с ост-ми водно-илистой грязи свежего извержения	4	4	10	82	1,3	8	10	14	260	1,3	8	4	14	125	10,4
Среднее значение по вулкану				66,3	1,0				170,3	0,88				61	5,6

Таблица 3

Средние содержания (%) микроэлементов в брекчиях грязевых вулканов Гобустана

Название вулкана	Тип пород	Колич. образцов	Mg	Mn	Ga	V	Y	Cu	Zr	Yb	Ba	Se
Дашгиль	алевролит	8	>1	0,045	0,0010	Необ.	Необ.	0,0020	0,0025	Необ.	Необ.	Необ.
	песчаник	13	0,75	0,15	Необ.	0,0014	0,0020	0,0035	0,0023	0,00010	0,020	0,00085
	глина	14	>1	0,083	0,0023	0,0033	0,0025	0,0065	0,0013	0,00025	0,018	0,00094
	шлам	4	>1	0,075	0,0028	0,0030	0,0013	0,0030	0,0014	0,00010	0,020	0,00080
Готурдаг	алевролит	10	>1	0,087	0,0014	0,00013	0,0014	0,0048	0,0023	0,00012	0,018	Необ.
	песчаник	15	>1	0,083	0,0017	0,0030	0,0013	0,0043	0,0016	0,00013	Необ.	0,00097
	глина	20	>1	0,058	0,0015	Необ.	0,0011	0,0013	0,0016	0,00010	Необ.	Необ.
	известняк	11	0,70	0,14	Необ.	Необ.	Необ.	0,0038	0,0013	Необ.	Необ.	Необ.

По нашему мнению, для количественной оценки фоновых значений элементов и их высоких концентраций необходимо учитывать цикличность в миграции и периодичность в распределении и накоплении химических элементов в земной коре. В этой связи возникает вопрос о генезисе химических элементов и преобразованиях, которым они подвергаются в последующих изменившихся

геологических ситуациях. К решению этих сложных вопросов приходится подходить с особой тщательностью, так как необоснованные, скоропостижные выводы могут привести к ошибочным заключениям. Только этим можно объяснить тот факт, что некоторые исследователи (А.Д. Израелян, Э.М. Джафарова, 1973) происхождение элементов группы железа (Ni, V, Cr, Ti, Fe, Cu)

рассматривают в совокупности с образованием кластических терригенных пород. Тем не менее, результаты работ последних лет однозначно доказывают, что происхождение вышеназванных элементов связано с дифференциацией (ликвацией) основных магматических интрузий, образующих крупные месторождения Fe, Ni, Cr.

Приблизительно такая же ситуация и с бором. Повышенные содержания этого элемента в глинах майкопской серии стали причиной предположений о том, что бор является экзогидратогенным образованием осадочного происхождения (А.А. Ализаде, 1958), тогда как первоисточником его служит внедряющаяся в земную кору магма.

Для определения закономерностей распределения химических элементов в осадочном чехле, в зависимости от временного фактора (по вертикали) или об их фациальной зависимости (по горизонтали), необходимо восстановить не отдельно взятый отрезок времени, а историю общего геологического развития области в контексте генезиса, путей миграции и условий накопления этих элементов с учетом их физико-химических свойств. Отдельно взятые отрывочные сведения о количественном распределении элементов – и на этой основе приуроченность их к отдельному отрезку времени или к отдельной группе пород, уводит исследователя от истинного положения дел. Так, элементы того же семейства (Ni, V, Cr, Ti, Fe, Mn, Cu) в Шамахи-Гобустанском районе в неогеновых отложениях выделяются повышенными значениями по сравнению с верхнемеловыми. Обратная картина наблюдается на южном склоне Большого Кавказа. То же можно сказать о Mn и Ba, высокие концентрации которых, как правило, приурочены к хемогенным карбонатным породам Ю. Гобустана. В последнем примере Ba, как элемент нижней половины таблицы Менделеева с тяжелым атомным весом (137,34), при наличии влаги переходит в трудно растворимый сульфат ($BaSO_4$), осаждается и, таким образом, сравнительно быстро выходит из процесса миграции, тогда как Mn продолжает свой путь. Концентрация Sr в верхнемеловых отложениях связана со способностью этого элемента входить в изоморфную ковалентную связь с Ca. Так как в меловых отложениях часто присутствует карбонат кальция ($CaCO_3$), катион которого замещается стронцием, создается впечатление о характерном накоплении его в горных породах мелового периода.

Отметим, что возможно, некоторые заключения автора дискуссионные, что вполне естественно для научной работы. Однако позиция автора достаточно ясна и не исключает научной полемики, способствующей дальнейшим исследованиям геохимических особенностей химических элементов в сопочных брекчиях грязевых вулканов и других комплексах осадочных пород.

Заключение. Проведенные геолого-геохимические исследования условий накопления бора и редких щелочей в грязевулканических продуктах, на примере ряда представительных грязевых вулканов Абшеронского полуострова и Гобустана, позволяют наметить следующие особенности и рекомендации по направлению дальнейших научно-практических работ.

1. Грязевулканизм является благоприятным фактором накопления бора, лития и цезия в практически интересных значениях.

2. Редкие щелочи – литий, рубидий и цезий составляют типоморфное геохимическое сонахождение с борной минерализацией. Максимальные значения их концентраций отмечены в сопочных брекчиях свежего извержения с остатками водно-илистой грязи.

3. Дисперсия выборки, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации являются наиболее контролирующими параметрами функций распределения исследуемых элементов в сопочных брекчиях. По оценкам этих параметров выяснилось, что литий и цезий обнаруживают значительный привнос в ходе грязевулканических новообразований. В силу низких величин коэффициента вариации и среднеквадратического отклонения, с учетом низкого коэффициента концентрации, можно допустить отсутствие заметного привноса рубидия в этих образованиях.

4. Установленные средние значения концентрации бора (0,216 кг/т), лития (55 г/т), рубидия (132 г/т) и цезия (50 г/т) могут быть рассмотрены как первые количественные параметры геохимической специализации сопочных брекчий на примере вулканов Абшеронского полуострова и Гобустана.

Эти параметры могут быть использованы для уточнения так называемых провинциальных кларков геохимического районирования, успешного анализа фаций грязевулканического извержения, геохимического прогноза поисков бора и редких щелочей, а также решения других задач.

Список использованной литературы

- Бабаев, Н.И. (2016). Эндогенные боросные комплексы Малого Кавказа. *Известия ВТУЗов Азербайджана*, 1(101), 18, 18–24.
- Бабаев, Н.И. (2018). Перспективы поисков горного агрономического сырья в Азербайджане. *Горный журнал*, 193(2248), 3, 91–94.
- Бабаев, Н.И. (2019). Минеральные формы нахождения бора в геологических комплексах Азербайджана. *Материалы XIX Международной научно-практической Конференции*, 2-5 апреля, Москва, 218–222.
- Дубенский, А.С. (2018). Групповое сорбционно-масс-спектрометрическое определение Ru, Rh, Pd, Ir, Pt и Au в горных породах и рудах с использованием сверхсшитых полистиролов. 24–32.
- Лысенко, В.И. (2012). Предполагаемое появление грязевого вулканизма в горном Крыму. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, 3, 86–87.
- Собисевич, А.Л., Собисевич, Л.Е., Тверитинова, Т.Ю. (2014). О грязевом вулканизме в позднеальпийском складчатом сооружении северо-западного Кавказа (на примере изучения глубинного строения грязевого вулкана Шуго). *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, 2, 80–93.
- Холодов, В.Н. (2012). Грязевые вулканы: распространение и генезис. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, 4, 21–29.
- Холодов, В.Н. (2019). Термобарические обстановки глубин осадочно-породных бассейнов и их флюидодинамика. Сверхвысокие давления и грязевые вулканы. *Литология и полезные ископаемые*, 1, 44–59.
- Шнюков, Е.Ф. (2013). Грязевые вулканы Черного моря как поисковый признак газогидратов метана. *Литология и полезные ископаемые*, 2, 119–127.
- Largest mud volcano. (2004). Guinness World Records. 2004-09-15. Получено 2018-09-24 с <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/largest-mud-volcano>.
- Newton, R.S., Cunningham, R.C., Schubert, C.E. (1980). Mud volcanoes and pockmarks: seafloor engineering hazards or geologic curiosities. *Proceedings – Annual Offshore Technology Conference, Houston, USA, May 5-8*, 1, 425–435.

Reference

- Babayev, N.I. (2016). Endogenous boron complexes of the Lesser Caucasus. *News technical college of Azerbaijan*, 1 (101), 18, 18–24.
- Babayev, N.I. (2018). Prospects for the searching for mining agronomic raw materials in Azerbaijan. *Mining Journal*, 3, 193 (2248), 91–94. [in Russian]
- Babayev, N.I. (2019). Mineral forms of boron occurrence in geological complexes of Azerbaijan. *Materials of the XIX International Scientific and Practical Conference, April 2-5, Moscow*, 218–222. [in Russian]
- Dubensky, A.S. (2018). Group sorption-mass spectrometric determination of Ru, Rh, Pd, Ir, Pt and Au in rocks and ores using over-crosslinked polystyrene. 24–32. [in Russian]
- Kholodov, V. N. (2019). Thermobaric conditions of the depths of sedimentary-rock basins and their fluid dynamics. Ultra-high pressures and mud volcanoes. *Lithology and minerals*, 1, 44–59. [in Russian]
- Kholodov, V.N. (2012). Mud volcanoes: distribution and genesis. *Geology and minerals of the World Ocean*, 4, 21–29.
- Largest mud volcano. (2004). Guinness World Records. 2004-09-15. Получено 2018-09-24 с <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/largest-mud-volcano>.
- Lysenko, V.I. (2012). Assuming emergence of mud volcanism in the Crimea ridge. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*, 3, 86–87. [in Russian]

Newton, R.S., Cunningham, R.C., Schubert, C.E. (1980). Mud volcanoes and pockmarks: seafloor engineering hazards or geologic curiosities. *Proceedings – Annual Offshore Technology Conference. Houston, USA, May 5-8, 1, 425-435.*

Shnyukov, E.F. (2013). Mud volcanoes of the Black Sea as a search indicator for methane gas hydrates. *Lithology and minerals*, 2, 119-127. [in Russian]

Sobisevich, A.L., Sobisevich, L.E., Tveritinova, T.Y. (2014). About mud volcanism in the late Alpine folded structure of the northwestern Caucasus (the case of studying the deep structure of the Shugo mud volcano). *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*, 2, 80-93. [in Russian]

Надійшла до редколегії 11.05.21

N. Babayev, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
E-mail: nibabayev@yandex.ru;
Azerbaijan State University of Oil and Industry,
20 Azadliq (Liberty) Ave., Baku, AZ1010, Azerbaijan

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE ACCUMULATION OF RARE AND SCATTERED ELEMENTS IN THE BRECCIAS OF MUD VOLCANOES OF AZERBAIJAN (ABSSHERON PENINSULA, GObUSTAN)

Based on modern field and laboratory studies, the conditions for the accumulation of some rare and scattered elements in mud volcano breccias have been described in the article, using the example of the most characteristic mud volcanoes of Abssheron and Gobustan.

A typomorphic geochemical association with boron mineralization of rare and scattered elements in solid products of mud volcanic eruptions has been determined. It has been revealed that mud volcanism is a favorable factor for the accumulation of boron, lithium, cesium and strontium in mud volcano breccias in practically interesting values.

The maximum values of these concentrations were noted in the fresh erupted mud volcano breccias with remnants of water-silty mud.

Sample variance, standard deviation, and coefficient of variation are the most controlling parameters of the distribution functions of the studied elements in mud volcano breccias. According to the estimates of these parameters, it has been found that the mud volcanic new formations are rich in boron, lithium and cesium, while not being rich in rubidium.

The established average values of the concentration of boron (0.216 kg/t), lithium (55 g/t), rubidium (132 g/t) and cesium (50 g/t) can be considered as the first quantitative parameters of the geochemical specialization of mud volcanic eruption products using the example of Abssheron Peninsula and Gobustan. These parameters can be used to refine the so-called provincial clarkes of geochemical zoning, prediction of prospecting for boron and rare alkalis, and other problems.

Keywords: mud volcano, breccia, rare elements, mineralization, clarkes, concentration, boron, alkaline elements, spectral analysis.

Н. Бабаєв, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,
E-mail: nibabayev@yandex.ru;
Азербайджанський державний університет нафти і промисловості,
Пр. Свободи, 20, Баку, AZ1010, Азербайджан

ГЕОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ НАКОПИЧЕННЯ РІДКІСНИХ І РОЗСІЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У СОПКОВИХ БРЕКЧІЯХ ГРЯЗЬОВИХ ВУЛКАНІВ АЗЕРБАЙДЖАНУ (АБШЕРОНСЬКИЙ ПІВОСТРІВ, ГОБУСТАН)

На підставі сучасних польових і лабораторних досліджень описано умови накопичення деяких рідкісних і розсіяних елементів у сопкових брекчіях, на прикладі найбільш характерних грязьових вулканів Абшерона і Гобустана.

Визначено типоморфну геохімічну асоціацію з борною мінералізацією рідкісних і розсіяних елементів у твердих продуктах виверження грязьових вулканів. Виявлено, що грязевулканізм є сприятливим фактором для накопичення бору, літію, цезію і стронцію в сопкових брекчіях у практично цікавих значеннях. Максимальні значення цих концентрацій відзначені в сопкових брекчіях свіжого виверження із залишками водноілістого бруду.

Дисперсія вибірки, середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації є найбільш контролюючими параметрами функцій розподілу досліджуваних елементів у сопкових брекчіях. За оцінками цих параметрів з'ясувалося, що бор, літій і цезій виявляють значний привнос у ході грязевулканічних новоутворень, а рубідій – ні.

Встановлені середні значення концентрації бору (0,216 кг/т), літію (55 г/т), рубідію (132 г/т) і цезію (50 г/т) можуть бути розглянуті як перші кількісні параметри геохімічної спеціалізації грязевулканічних продуктів виверження на прикладі Абшеронського півострова і Гобустана. Ці параметри можуть бути використані для уточнення так званих провінційних кларків геохімічного районування, прогнозу пошуків бору і рідкісних лугів, а також вирішення інших завдань.

Ключові слова: грязьовий вулкан, брекчія, рідкісні елементи, мінералізація, кларк, концентрація, бора, лужні елементи, спектральний аналіз.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.042: 553.43

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.10>В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vladvam@gmail.com;С. Шнюков, д-р. геол. наук, доц.,
E-mail: shnyukov54@gmail.com;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;А. Коструба, д-р юрид. наук, проф.,
anatolii.kostruba@pnu.edu.ua,Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна;Т. Харитоновна, д-р юрид. наук, проф.,
E-mail: haritonova@onua.edu.ua;Х. Григорєва, д-р юрид. наук, доц.,
E-mail: gergina8888@gmail.com;Національний університет "Одеська юридична академія",
Фонтанська дорога, 23, м. Одеса, 65009, Україна;М. Ткалич, канд. юрид. наук, доц.,
E-mail: maxx.tkalich@gmail.com,Запорізький національний університет,
вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69000, УкраїнаПРАВОВІ АСПЕКТИ ПЕРЕРОБКИ ЗАЛІЗНИХ РУД
КРИВОРІЗЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО БАСЕЙНУ

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

Чинна редакція Податкового кодексу допускає різночитання в трактуванні терміна "первинна переробка мінеральної сировини". Зокрема, податкові органи вважають, що первинна переробка мінеральної сировини включає одержання магнетитового концентрату, який у такому випадку підлягає оподаткуванню. Тобто деякі гірничозбагачувальні підприємства стикнулися з проблемою подвійного оподаткування, що загрожує значними фінансовими втратами. Відповідно, це зумовило вибір теми для написання цієї статті, метою якої є проведення наукового дослідження щодо зміни мінеральних форм корисних копалин (залізної руди), їх агрегатно-фазового стану, кристалохімічної структури під час виробничих процесів на добувному, дробильному та збагачувальному виробництвах гірничозбагачувальних підприємств Криворіжжя, а також встановлення, на якому саме етапі виробництва завершується первинна переробка корисних копалин для цілей оподаткування рентною платою, і чи відповідає позиція підприємств щодо обмеження первинної переробки стадією дроблення вимогам Податкового кодексу України.

Ключові слова: податковий кодекс, надрокористування, подвійне оподаткування, мінеральна сировина, залізорудний басейн.

Вступ. Залізні руди є основою чорної металургії України. Основним залізорудним басейном України є Криворізький, де деякі гірничозбагачувальні підприємства розробляють поклади залістистих кварцитів і багатих магнетитових і гематитових кварцитів палеопротерозойського віку.

Видобуток, первинну обробку і збагачення залізних руд Криворізького залізорудного басейну здійснюють ряд гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК), які розробляють такі родовища:

- Центральний (ЦГЗК) – Велика Глеюватка, Петровське, Артемівське родовища, шахта ім. Орджонікідзе;
- Північний (ПГЗК) – Першотравневе і Ганнівське родовища залістистих кварцитів;
- Інгuleцький (ІГЗК) – Інгuleцьке родовище залістистих кварцитів;
- Південний (ПГЗК) – Скелюватське родовище залістистих кварцитів;
- ПАТ "Арселорміттал Кривий Ріг" (ПАТ АМКР) – Вальківське і Новокриворізьке родовища залістистих кварцитів;
- ПАТ "Суша Балка" – багаті залізні руди в полях шахт "Ювілейна" і "Ім. Фрунзе".

Гірничозбагачувальні підприємства зазвичай об'єднують добувну, дробильну і збагачувальну виробництва. Підприємства розробляють переважно поклади залістистих кварцитів палеопротерозойського віку, які

проходять первинну переробку на дробильних фабриках, у результаті якої отримують залізну руду, яка є товарною продукцією підприємств і яку вони можуть реалізувати як готову товарну продукцію. Саме ця продукція традиційно підлягала рентному оподаткуванню. У подальшому відбувається процес глибинного збагачення подрібненої залізної руди на рудозбагачувальних фабриках, унаслідок чого утворюється магнетитовий концентрат, який якісно відрізняється від первинної залізної руди і який раніше не оподатковувався.

Постановка питання. Проблема полягає в тому, що в новій редакції Податкового кодексу України (ПК) (2011) нечітко сформульоване поняття первинної переробки мінеральної сировини, а саме: "первинна переробка (збагачення) мінеральної сировини як вид господарської діяльності гірничого підприємства включає сукупність операцій збирання, дроблення або мелення, сушки, класифікацію (сортування), брикетування, збагачення фізико-хімічними методами (без якісної зміни мінеральних форм корисних копалин, їх агрегатно-фазового стану, кристалохімічної структури), за виключенням агломерації/грудкування руди з термічною обробкою, агломерацію та збагачення фізико-хімічними методами, а також може включати переробні технології, що є спеціальними видами робіт з добування корисних копалин (підземна газифікація та виплавлення, хімічне та бактеріальне вилугування, дражна та гідравлічна

розробка розсипних родовищ, гідравлічний транспорт гірничих порід покладів дна водойм)". Ця редакція надала змогу податковим органам вважати, що первинна переробка мінеральної сировини включає магнетитовий концентрат, який у такому випадку підлягає оподаткуванню. Тобто деякі гірничозбагачувальні підприємства Криворіжжя стикнулися з проблемою подвійного оподаткування, що загрожує значними фінансовими втратами (йдеться про мільярди гривень). Не потребує доказів і теза про те, що подвійне оподаткування є вкрай негативним і небезпечним явищем. У цьому випадку присутні і порушення принципу недискримінації, і несприятливий вплив на інвестування, товарообмін, внутрішньодержавну податкову систему тощо.

Це потребує проведення наукових досліджень щодо зміни мінеральних форм корисних копалин (залізної руди), їх агрегатно-фазового стану, кристалохімічної структури під час виробничих процесів на добувному, дробильному та збагачувальному виробництві гірничозбагачувальних підприємств Криворіжжя, з метою встановлення, на якому етапі виробництва завершується первинна переробка корисних копалин для цілей оподаткування рентною платою, і чи відповідає позиція підприємств щодо обмеження первинної переробки стадією дроблення вимогам ПК України (2011) та інших інструктивних документів (*Гірничий закон...*, 1999; *Класифікація запасів...*, 1997; *Кодекс України "Про надра"...*, 1994; *Положення про Державну...*, 2015; *Про затвердження положення...*, 2003 та ін.).

Отже, головним завданням досліджень було встановити, на якому етапі виробничих процесів ГЗК завершується первинна переробка мінеральної сировини, а саме залізної руди, і чи відбуваються якісні зміни рудної речовини під час її збагачення.

Стисла характеристика геологічної будови басейну. Криворізький залізорудний басейн складений осадовими і вулканогенно-осадовими глибоко метаморфізованими утвореннями палеопротерозою криворізької серії, яка включає такі світи (знизу): новокриворізьку, скелюватську, саксаганську, гданцівську і перекриваючу її глеюватську світи. Геологічна будова басейну описана в численних наукових публікаціях (*Белевцев. Белевцев, 1981; Гурський та ін., 2008; Державна геологічна...*, 2005; *Довгий та ін., 2017; Куделя, 1984; Кулиш, Плотноков, 2005; Лазаренко і др., 1977; Михайлов та ін., 2007; Рудько та ін., 2010, 2012, 2013; Смірнов та ін., 2010, 2012 та ін.*). Основною продуктивною товщею залізорудного басейну є саксаганська світа, в розрізі якої беруть участь сім залізістих горизонтів завтовшки від 20 до 145 м, складених магнетитовими, силікат-магнетитовими, магнетит-силікатними, магнетит-карбонатними, магнетит-карбонат-силікатними, карбонат-магнетитовими, карбонат-силікат-магнетитовими, карбонат-силікатними, гематит-магнетитовими кварцитами, а в зонах гіпергенезу – мартитовими, дисперсногематит-мартитовими, гематит-мартитовими рудами. Прошарки залізних руд зустрічаються також у гданцівській світі.

Виділяється декілька геолого-промислових типів руд: саксаганський, інгулецький, першотравневий, скелюватський, правобережний, верхівцевський, білогородський. Перші три є багатими рудами (вміст заліза 46 % і більше), чотири інших – бідними (вміст заліза 20–45 %).

Основні залізорудні родовища басейну: Інгулецьке, Скелюватське-Магнетитове, Скелюватське, Валявкинське, Новокриворізьке, Шахта "Північна" ім. Валявка, Шахта "Гігант-глибока", Східновалявкинське, ім. Кірова, Шахта "Батьківщина", Велика Глеюватка, Шахта

"Жовтнева", Шахта ім. Фрунзе, Шахта "Ювілейна", Шахта ім. Леніна, Шахта "Гвардійська", Шахта ім. Орджонікідзе, Первомайське, Шахта "Первомайська", Аннівське, Петрівське, Жовторіченське, Артемівське та ін.

Основні типи залізних руд Кривбасу:

- Легкозбагачувані неокиснені магнетитові кварцити з гематитом, мартитом та ін., середній вміст Fe = 33,3–34,2 %, переважно скелюватського типу (родовища Інгулецьке, Скелюватське-Магнетитове, Новокриворізьке, Первомайське, Валявкинське, Аннівське, Велика Глеюватка та ін.);

- Багаті залізні мартитові, гематит-мартитові, рідше магнетитові, гематит-магнетитові, гетит-залізо-слюдково-мартитові руди саксаганського типу з вмістом 46–67 % Fe (середнє 56,7–58,1 %), P_2O_5 – 0,02 %, S – 0,16 %, представлені пласто-, лінзо-, стовпоподібними покладами потужністю 10–100 м;

- Важкозбагачувані окиснені залізісті кварцити зон гіпергенезу магнетитових кварцитів; виділяються різновиди: гетит-дисперсногематит (залізо-слюдково)-гематит-мартитові, гетит-дисперсногематитові тощо.

У складі залізних руд переважають магнетит, гематит, мартит, залізна слюдка, дисперсний гематит, гетит, інші гідроксиди заліза, кварц, карбонати, кумінгтоніт, біотит, хлорит, силіманіт, гранат, рибекіт, егірин; другорядні мінерали – альбіт, амфібол, апатит, ільменіт, силіманіт, пірит, піротин; гіпергенні – алуніт, гідраргіліт, каолініт, лімоніт, хлориди тощо.

Окиснені руди представлені гематитовими, мартитовими, гетит-мартитовими, гематит-мартитовими кварцитами з рудними прошарками, складеними переважно зернами і агрегатами гематиту, мартиту (0,02–0,2 мм), залізної слюдки, проміжки між якими виповнені зернами кварцу і карбонату і нерудними прошарками, складеними переважно кварцовими зернами (0,02–0,1 мм) з домішкою дисперсного дрібнозернистого гематиту і гідрооксидів заліза.

Отже, для залізних руд Криворізького басейну характерним є виключне розмаїття мінерального і хімічного складу, а також структурно-текстурних особливостей руд. Тут присутні руди різного геолого-генетичного типу (неокиснені, окиснені), різного мінерального складу (магнетитові, гематит-магнетитові, силікат-магнетитові, магнетит-силікатні, магнетит-гематитові, карбонат-магнетитові, силікат-карбонат-магнетитові, магнетит-силікат-карбонатні, гематитові, мартитові, гематит-мартитові, магнетит-мартитові, лімоніт-мартитові, гетит-мартитові). Вони характеризуються переважно смугастою текстурою, в якій рудні прошарки чергуються з безрудними, а рудні мінерали (насамперед магнетит, а також гематит, мартит, залізна слюдка, кумінгтоніт, залізісті карбонати) утворюють дрібну вкрапленість серед нерудних мінералів (кварц, нерудні карбонати, апатит тощо), агрегати і зростки з останніми. Ці особливості руд родовищ зумовлюють особливості їх подальшої обробки і збагачення.

Стисла характеристика підприємств. Гірничозбагачувальні комбінати Криворіжжя здебільшого розробляють залізісті (магнетитові) кварцити залізістих горизонтів переважно саксаганської світи криворізької серії палеопротерозою зазвичай кар'єрним способом. Надамо стислу характеристику основних ГЗК на основі відкритої інформації, яка існує на сайтах відповідних підприємств.

Центральний ГЗК здійснює видобуток, переробку руд і виробництво залізорудного концентрату і окатишів для металургійної промисловості. Він входить до групи "Метінвест" ТОВ "Метінвест Холдинг".

Добувний комплекс підприємства представлений кар'єром № 1 на базі Глеюватського родовища (проектна

потужність – 6,0 млн т магнетитових залізистих кварцитів на рік); кар'єром № 3 на базі Петровського родовища (6,0 млн т); кар'єром № 4 на базі Артемівського родовища (4 млн т), а також шахтою ім. Орджонікідзе, шахтою ім. Артема № 2 і шахтою "Гігант-глибока", які розробляють магнетитові кварцити покладу "Південно-Магнетитова" (1,6 млн т).

Переробний комплекс включає дробильну фабрику потужністю 28 млн т руди на рік, збагачувальну фабрику потужністю понад 6 млн т залізорудного концентрату на рік, фабрику огрудування потужністю понад 2,0 млн т окатишів на рік, допоміжні цеха, шламосховище.

У 2020 р. на комбінаті було вироблено 4840 тис. т залізорудного концентрату із вмістом заліза 66,3–68,0 % і 2840 тис. т окатишів із вмістом заліза 59,9–63,5 %. Основні споживачі продукції комбінату: Криворізька, Азовсталь, Дніпровський МК, металургійні комбінати Польщі, Румунії, Словаччини, Чехії.

Північний ГЗК також входить до групи "Метінвест" і здійснює повний технологічний цикл від видобутку залізної руди до виготовлення залізорудного концентрату (вміст заліза 66 %) і окатишів (вміст заліза 60,3–63,5 %).

Сировинною базою підприємства є Першотравневе і Ганнівське родовища залізистих кварцитів із загальними запасами понад 3,1 млрд т руди, які розробляються кар'єрами. Першотравневий кар'єр – один з найбільших в Україні, його довжина сягає 3 тис. м, ширина – 2,5 тис. м, глибина – 400 м (проектна глибина 650 м). Ганнівський кар'єр з довжиною 5250 м, шириною 1200 м, глибиною 275 м має проектну продуктивність 10 млн т руди на рік.

Переробний комплекс підприємства включає три дробильні фабрики, дві збагачувальні фабрики, два цехи виробництва окатишів і ряд допоміжних цехів. На збагачувальних фабриках дроблена руда проходить три стадії подрібнення, збагачення на магнітних сепараторах, дешламацію і фільтрацію, в результаті чого отримують залізорудний концентрат із вмістом заліза 66 %. У цехах виробництва окатишів отримують окатиші із вмістом заліза 60,3–63,5 %. У 2020 р. було вироблено залізорудного концентрату 12650 тис. т і 6500 тис. т окатишів.

Основними споживачами продукції комбінату є найбільші металургійні підприємства України, Європи і Китаю.

Інгuleцький ГЗК – найбільший в Україні виробник залізорудного концентрату із вмістом заліза від 64 % до 67 %. Розробляє Інгuleцьке родовище залізистих кварцитів. На підприємстві використовується циклічно-потокова технологія видобування руди з використанням автомобільно-конвеєрного транспорту. Балансові запаси руди – 1,2 млрд т. Входить до групи "Метінвест Холдинг".

Підприємство спеціалізується на видобутку і переробці залізистих кварцитів Інгuleцького родовища, розташованого в південній частині Криворізького залізорудного басейну. Розробку родовища здійснює кар'єр з виробничою потужністю гірничої маси 70 млн т на рік. Максимальний розмір куска підірваної руди 1200 мм. Звідти руда потрапляє на дробильну фабрику виробничою потужністю переробки понад 36 млн т руди на рік.

Збагачення відбувається на двох збагачувальних фабриках з річною виробничою потужністю понад 14,5 млн т концентрату на рік із вмістом заліза 63,7–67,0 %. Технологічна схема збагачувальних фабрик включає 4 стадії дроблення, 3 стадії подрібнення і 4–5 стадій магнітної сепарації. У кожній стадії отримують відходи, а промпродукт переробляють далі. Як операцію попереднього збагачення застосовують суху магнітну сепарацію у слабкому полі. На фабриці № 3 застосовано схему самопомелу руди; передбачено дроблення

сировини до 300 мм, дві стадії подрібнення і три стадії магнітної сепарації, що виконується в 2–3 прийоми.

У цілому по комбінату в результаті повного циклу збагачення із руди з масовою часткою загального заліза ($Fe_{\text{заг}}$) 32,6–36,7 % отримують концентрат із масовою часткою $Fe_{\text{заг}}$ 63,8–63,9 %, вологістю близько 10 %. Руди належать до категорії важко збагачувальних. Подальше збагачення здійснюється в цеху магнітно-флотаційного збагачення, де відбувається виробництво концентрату з масовою часткою заліза понад 67,0 %. У середньому на рік комбінат випускає близько 12,4 млн т концентрату.

ПАТ "ІНГЗК" реалізує залізорудний концентрат із вмістом заліза від 63,7 % до 67,0 %. Річний об'єм реалізації приблизно сягає 14 млн т концентрату. Основними споживачами є: ПАТ "ММК ім. Ілліча" (м. Маріуполь), БАТ "ЗМК Запоріжсталь" (м. Запоріжжя), БАТ "Алчевський МК" (м. Алчевськ), БАТ "МК Азовсталь" (м. Маріуполь), ПАТ "Єнакіївський МЗ" (м. Єнакієве), підприємства Китаю, Угорщини, Чехії.

Південний ГЗК виробляє залізорудний концентрат і агломерат. Видобуток руди здійснюється відкритим способом на Скелюватському родовищі з балансовими запасами магнетитових кварцитів – 962,2 млн т, окиснених кварцитів – 53,6 млн т. Руда поступає на дробильні фабрики, де встановлені дробарки типу ККД 1500/180; КСД 2200; КМД 2200.

Технологічна схема збагачення включає три стадії подрібнення і 4–5 стадій магнітної сепарації. На кожній стадії отримують відходи, а промпродукт переробляють далі. Основним методом збагачення є магнітний у слабкому полі. На збагачувальних фабриках використовують млини МШЦ 3,6 x 5,0; МШЦ 4,5 x 6,0; МШЦ 3,6 x 5,5; магнітні сепаратори типу ПБМ-120/250; вакуумфільтри Ду-100. У результаті із руди з масовою часткою загального заліза 35,01 %, заліза магнітного 27,33 % отримують концентрат із масовою часткою $Fe_{\text{заг}}$ – 64,77–65,31 %, вологістю близько 10 %.

У 2019 р. комбінат виробив 12,343 млн т концентрату із вмістом заліза 64,77–65,31 % і 0,946 млн т агломератів із вмістом заліза 53,31–54,13 %. Продукція комбінату надходить на металургійні підприємства України, Польщі, Чехії, Словаччини, Югославії, Румунії.

ПАТ "АМКР" видобуває залізні руди Валявкинського і Новокриворізького родовищ. Гірничо-збагачувальний комплекс ПАТ "АМКР" складається з добувного, дробильного і збагачувального виробництв.

Видобуток корисних копалин ведеться відкритим способом у двох кар'єрах: № 2-бис (глибина 280 м) – на Новокриворізькому і № 3 (глибина 315 м) – на Валявкинському родовищах. Вихідною сировиною кар'єру № 2-бис є неокиснені залізисті кварцити I і II залізистих горизонтів саксаганської світи, а кар'єру № 3 – IV залізистого горизонту тієї ж світи. Видобуток здійснюють за допомогою буровибухових робіт. На внутрішньокар'єрних дробарках відбувається первинне дроблення рудничної маси до розмірів не більше 1200 мм, що приводить до утворення кондиційної сировини, яка може зберігатися як готова продукція на рудних складах сировини. Але більша частина сировини передається на наступне дробильне виробництво.

На дробильних фабриках № 1 і 2 вихідна руда розміром до 1200 мм проходить чотири стадії дроблення з грохоченням і класифікацією з послідовним зменшенням розміру уламків до розміру шматків не більше 350 мм (1 стадія), не більше 90 мм (2 стадія), 20 мм (3 стадія) і не більше 12,5 % класу +20 мм (4 стадія).

На рудозбагачувальних фабриках № 1 і 2 збагачувальне виробництво здійснюється такими технологічними операціями, як подрібнення (мелення), класифікація, мокра магнітна сепарація, дешламація, зневоднення.

Технологічна схема збагачення магнетитових залізистих кварцитів на рудозбагачувальній фабриці № 1 включає три стадії подрібнення і класифікації, три стадії магнітної сепарації і стадію зневоднення концентрату методом вакуумного фільтрування, після яких готовий концентрат надходить на склад, а хвости збагачення транспортуються до хвостосховищ.

Процес збагачення на рудозбагачувальній фабриці № 2 має подібний характер. Тут дроблені залізні руди проходять три стадії подрібнення і класифікації; три стадії магнітної сепарації; три стадії обезшламлювання, у т. ч. дві стадії обезшламлювання зливів гідроциклонів і третю стадію обезшламлювання концентрату всіх технологічних секцій перед фільтрацією; стадію зневоднення концентрату методом вакуумного фільтрування.

Готовим продуктом після стадії збагачення магнетитової руди є концентрат магнетитовий, в якому масова частка заліза загального має становити 65,3 % з припустимими коливаннями від -0,5 % до +0,8 % від встановленого значення; масова частка води в концентраті не повинна перевищувати 10,5 %.

У процесі збагачення відбуваються суттєві зміни хімічного складу, зокрема вдвічі збільшується вміст заліза

загального (з 32,1–36,3 до 65,0–65,5 %), які супроводжуються значними змінами мінерального складу. Останні полягають у різкому збільшенні кількості магнетиту (до 95–99 %), у той час як переважна більшість інших мінералів (гематит, мартит, залізна слюдка, кумінгтоніт, залізисті карбонати, кварц, нерудні карбонати, апатит тощо) майже повністю вилучаються з кінцевого продукту. Це свідчить про якісні перетворення речовини.

Результати власних досліджень. Нами були проведені дослідження змін, які відбуваються з мінеральною речовиною залізних руд Криворізького залізорудного басейну і Кременчуцького залізорудного району. Їх характеристика надається з урахуванням результатів інших дослідників (Железисто-кремнистые..., 1989; Лазаренко и др., 1977; Маковский та ін., 2009; Павлишин, Довгий, 2008; Павлишин та ін., 2007; Тарасенко, 2000) та деяких методичних матеріалів (Курило та ін., 2014; Латиш, 2003; Юшко, 1984; Юшко и др., 1975 та ін.).

Встановлено, що перетворення первинного полімінерального агрегату (руди, мінеральної сировини) на магнетитовий концентрат супроводжується суттєвою зміною концентрацій їх головних компонентів – загального заліза (Fe^{total}), кремнезему (SiO_2), FeO та Fe_2O_3 (рис. 1, 2), тобто відбувається якісне перетворення речовини, завдяки чому виникає принципово новий продукт.

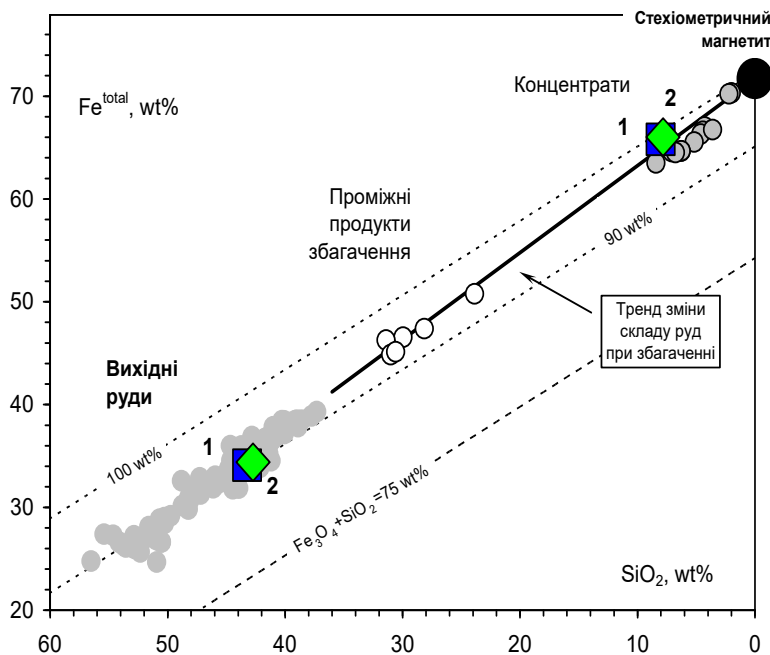


Рис. 1. Співвідношення головних компонентів [загального заліза (Fe^{total}) та кремнезему (SiO_2)] у залізних рудах та продуктах їх збагачення

Як бачимо, наведені графіки свідчать про закономірну зміну складу руд при їх збагаченні, що призводить до максимального наближення концентратів до складу стехіометричного магнетиту. Звичайно, що цей ефект зумовлюється перш за все вилученням зі складу первинної руди всіх нерудних мінералів (переважно силікатів та карбонатів). Однак значні перетворення відбуваються й на рівні рудних мінералів. Розглянемо їх.

Для рудних мінералів заліза (магнетиту, гематиту, мартиту) родовищ Криворізького залізорудного басейну давно встановлено (Лазаренко и др., 1977 та ін.) полістадійність формування, складність внутрішньої

будови індивідів, широкі варіації хімічного складу і фізичних властивостей, а також різноманітність форм зрощування між собою та нерудними мінералами. Останні наші дослідження з широким використанням методів скануючої електронної мікроскопії (SEM) та електронно-зондового мікроаналізу (EMP) дозволили одержати великий обсяг даних щодо складу та структури рудних мінералів заліза Криворізького залізорудного басейну і Кременчуцького залізорудного району. Ця інформація дозволяє більш детально охарактеризувати перетворення саме рудних мінералів, передусім магнетиту, при глибокому збагаченні руд.

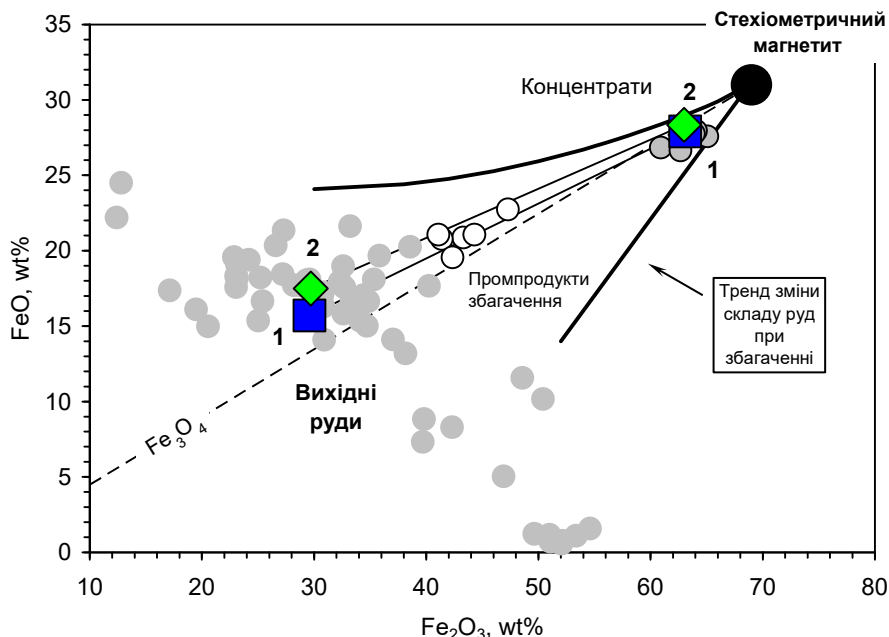


Рис. 2. Співвідношення FeO – Fe₂O₃ у залізних рудах та продуктах їх збагачення

Узагальнення одержаних даних за розподілом Fe^{total}₂O₃ у магнетитах та гематитах (рис. 3–5) дозволило зробити такі висновки:

1. Концентрації Fe^{total}₂O₃ замість простого бімодального розподілу, що відповідає магнетиту та гематиту, демонструють асиметричний розподіл з генеральним "магнетитовим" максимумом та "локальним" максимумом, який зсунуто у бік вюстититу. Асиметрія розподілу пояснюється наявністю значень, що відповідають не тільки гематиту, який перебуває в складних зрощеннях з магнетитом (рис. 4), але й мартитизованому магнетиту. Ступінь мартитизації варіює в широких межах, завдяки чому індивіди магнетиту можуть мати складну будову з чередуванням магнетит–мартит на рівні мікро- та нанорозмірних ділянок (рис. 5).

2. У наведених розподілах значну роль відіграють концентрації Fe^{total}₂O₃, які помітно перевищують значення "локального" максимуму (>105 wt%) аж до досягнення фактично вюститового рівня. Їх наявність, як і сам "локальний" максимум, скоріш за все пояснюється присутністю в магнетиті мікро- та нанорозмірних "відновлених" ("вюститоподібних") кластерів. Враховуючи недостатню просторову локальність ЕМР (~4–5 мкм) їх пряме виявлення не є можливим.

3. Присутність низьких (нижче гематитових) концентрацій Fe^{total}₂O₃ легко пояснюється частковим формуванням вторинного гетиту, що широко спостерігається на макрорівні (рис. 5) та в розрізах свердловин і кар'єрах.

Залучення узагальнених даних щодо співвідношень SiO₂ – Fe^{total}₂O₃ (рис. 6) у рудних мінералах заліза дає можливість доповнити наведені вище висновки:

1. Концентрації SiO₂ у рудних мінералах заліза варіюють у широких межах. Здебільшого вони не перевищують 0,1–1 wt %, однак можуть досягати й значно вищих значень (5 wt %).

2. У координатах Fe^{total}₂O₃ – SiO₂ композиції мінералів утворюють тренди, які добре узгоджуються з простими моделями двокомпонентних сумішей типу [рудний мінерал (магнетит, гематит, вюстит або гетит)] – [SiO₂].

3. Підвищені концентрації SiO₂ пов'язані з присутністю мікро- та нанорозмірних включень кремнезему

(кристалічного або аморфного). Розміри таких включень значно менші, ніж просторова локальність ЕМР (~4–5 мкм), що виключає їх аналіз окремо від матриці мінералу (магнетиту).

4. Включення SiO₂ можуть утворювати різноманітні за формою скупчення, які, на відміну від "вюститоподібних" кластерів, фіксуються на електронно-мікроскопічних зображеннях (режим *comp*) у вигляді більш темних та "строкатих" за фактурою ділянок зерен (рис. 7). Розмір таких включень – на межі роздільної здатності скануючого електронного мікроскопа. Звідси наша оцінка їх максимального розміру – 0,1 мкм.

Перелічені результати детальних досліджень дозволяють вважати, що закономірна зміна складу руд при їх глибокому збагаченні та максимальне наближення концентратів до складу стехіометричного магнетиту зумовлені далеко не тільки вилученням нерудних мінералів зі складу первинних руд. Велику роль відіграє й фактор "мінерального" рівня.

Дійсно, первинні рудні мінерали (перш за все магнетит) мають дуже складну будову. Їх індивіди багаті в чому являють собою суміш мікро- та нанорозмірних кластерів магнетит-гематит-вюстит-SiO₂ з широкими варіаціями їх співвідношень. Тому композиція значної частини індивідів магнетиту в цілому не відповідає стехіометрії. Тільки руйнування таких індивідів та "звільнення" кластерів надає можливість засобом магнітної сепарації утворити в результаті збагачення дійсно магнетитовий концентрат, який за складом принципово відрізняється не тільки від вихідної руди, але й від її рудної складової. Тобто відбувається якісна зміна мінеральної форми корисної копалини. Отже, мінералого-геохімічні дослідження залізних руд родовищ Криворізького залізорудного басейну і Кременчуцького залізорудного району дозволяють стверджувати, що на стадії збагачення руд відбуваються суттєві якісні перетворення мінеральної речовини, її агрегатно-фазового стану, кристалохімічної структури та інших характеристик, і корисна копалина – залізна руда – перетворюється на якісно інший промпродукт – магнетитовий концентрат, який вже не можна розглядати як корисну копалину.

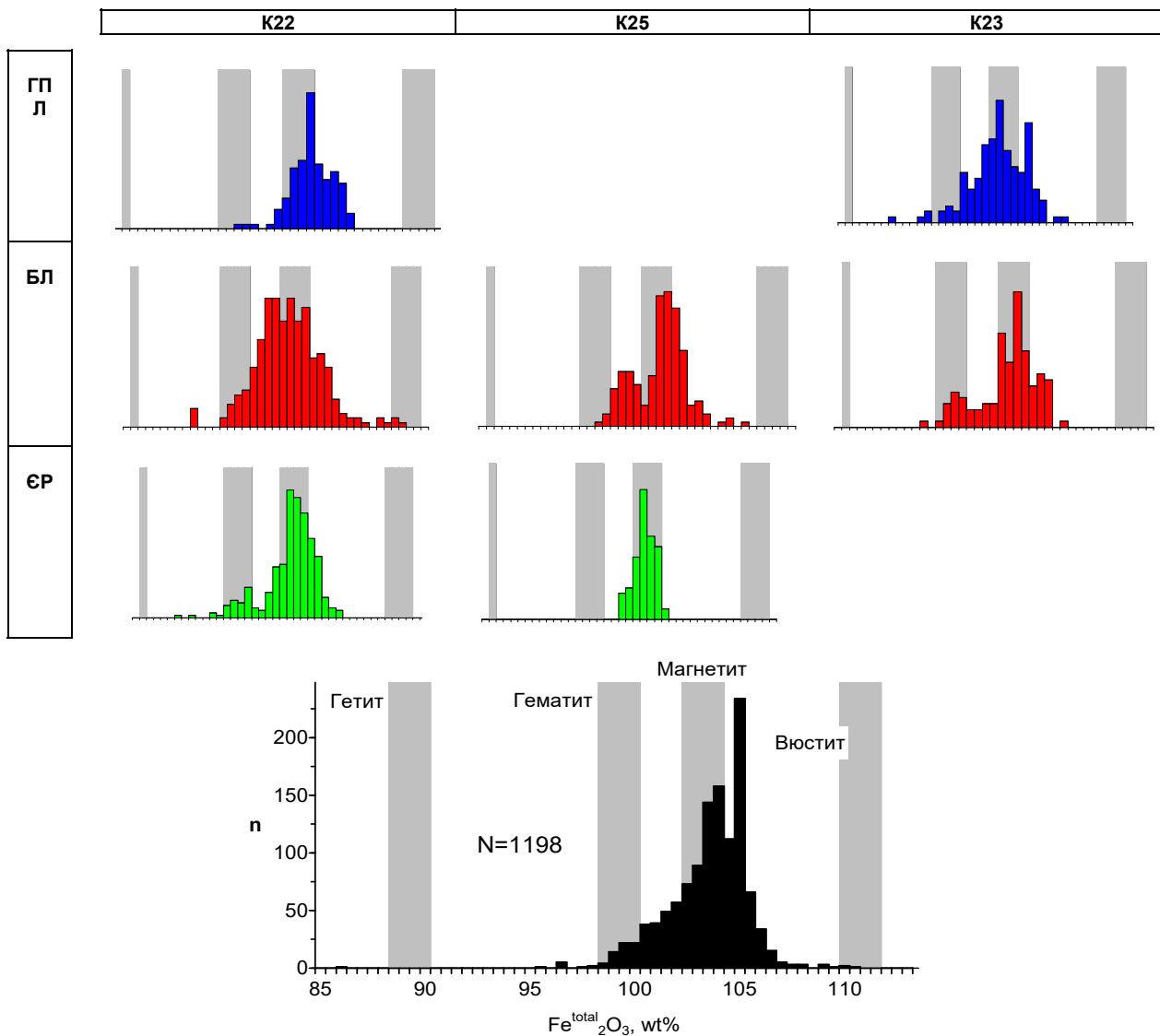


Рис. 3. Розподіл концентрацій загального заліза (Fe^{total}), представленого у вигляді $Fe^{total}_2O_3$, у рудних мінералах Fe підсвіт K22, K25 та K23 родовищ Кременчуцького залізорудного району:

ГПЛ – Горішньоплавнинське (+Лавриківське), БЛ – Біланівське, ЄР – Єрствівське. Стехіометричний склад гетиту показано умовно

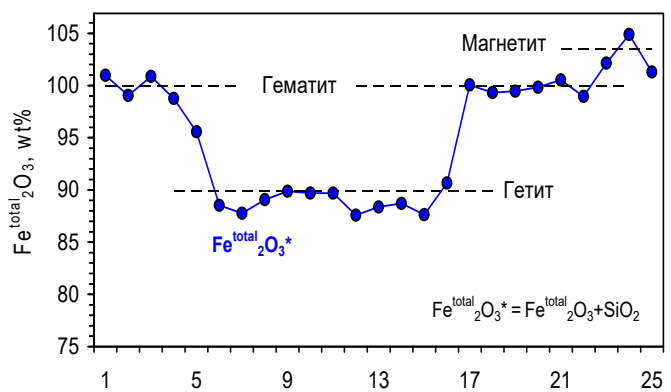
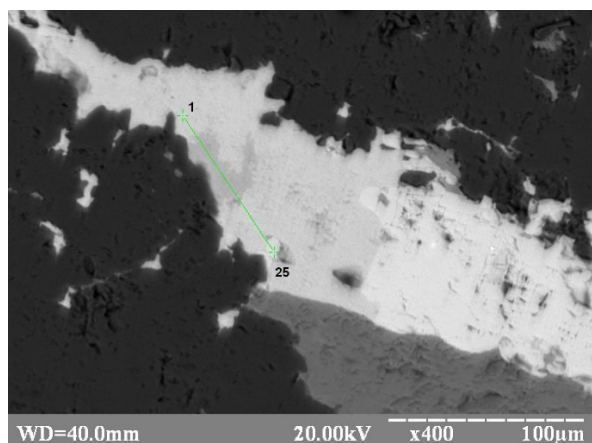


Рис. 4. Зрощення магнетиту (світло-сіре) з гематитом (сіре), який заміщується гетитом (темно-сіре).

Електронно-мікроскопічне зображення, режим *contour*.

Концентраційний профіль (ЕМР, крок – 4 мкм) демонструє близький до стехіометрії склад всіх трьох мінералів ($Fe^{total}_2O_3^* = Fe^{total}_2O_3 + SiO_2$ – корекція на приборний фон)

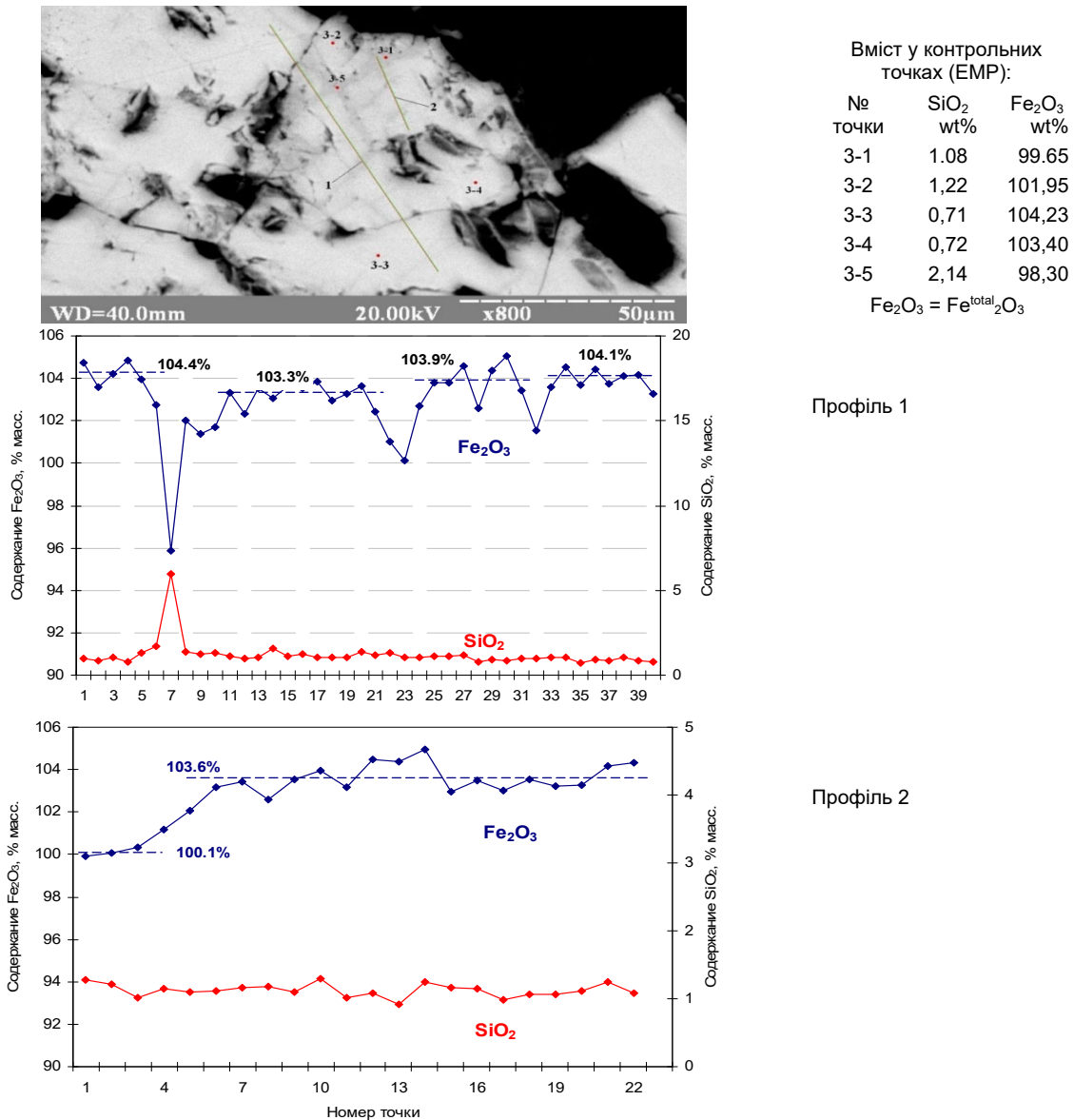


Рис. 5. Типова "гратчаста" структура мартитизованого магнетиту (електронно-мікроскопічне зображення, режим *contro*): магнетит – світло-сіре, мартит – темно-сіре, кварц – чорне. Концентраційні профілі (EMP), демонструють фактично стехіометричні вмісти $Fe_{total}O_3$ на ділянках, складених магнетитом та мартитом (103,3-104,4 та 100,1 wt % відповідно), а також поступовий перехід між ними при постійно низьких ("фонових") концентраціях SiO₂

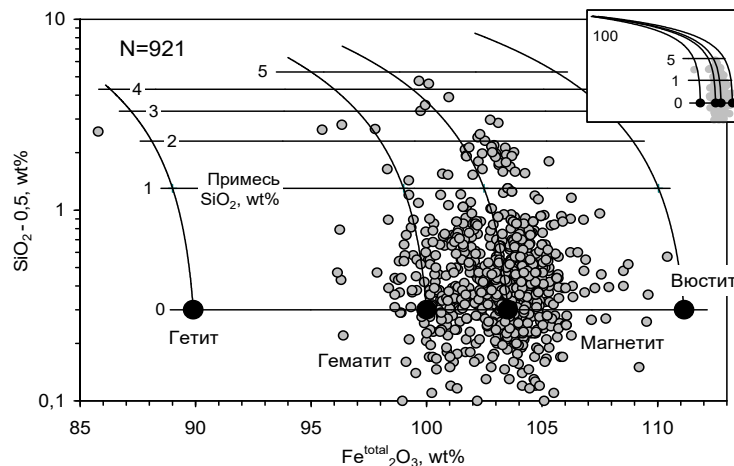


Рис. 6. Зв'язок вмісту загального заліза (Fe^{total}), представленого у вигляді $Fe_{total}O_3$, з концентраціями домішкового SiO₂ у рудних мінералах Fe родовищ Кременчуцького залізорудного району. Для концентрацій SiO₂ введено поправку на приборний фон (~0,5 wt %)

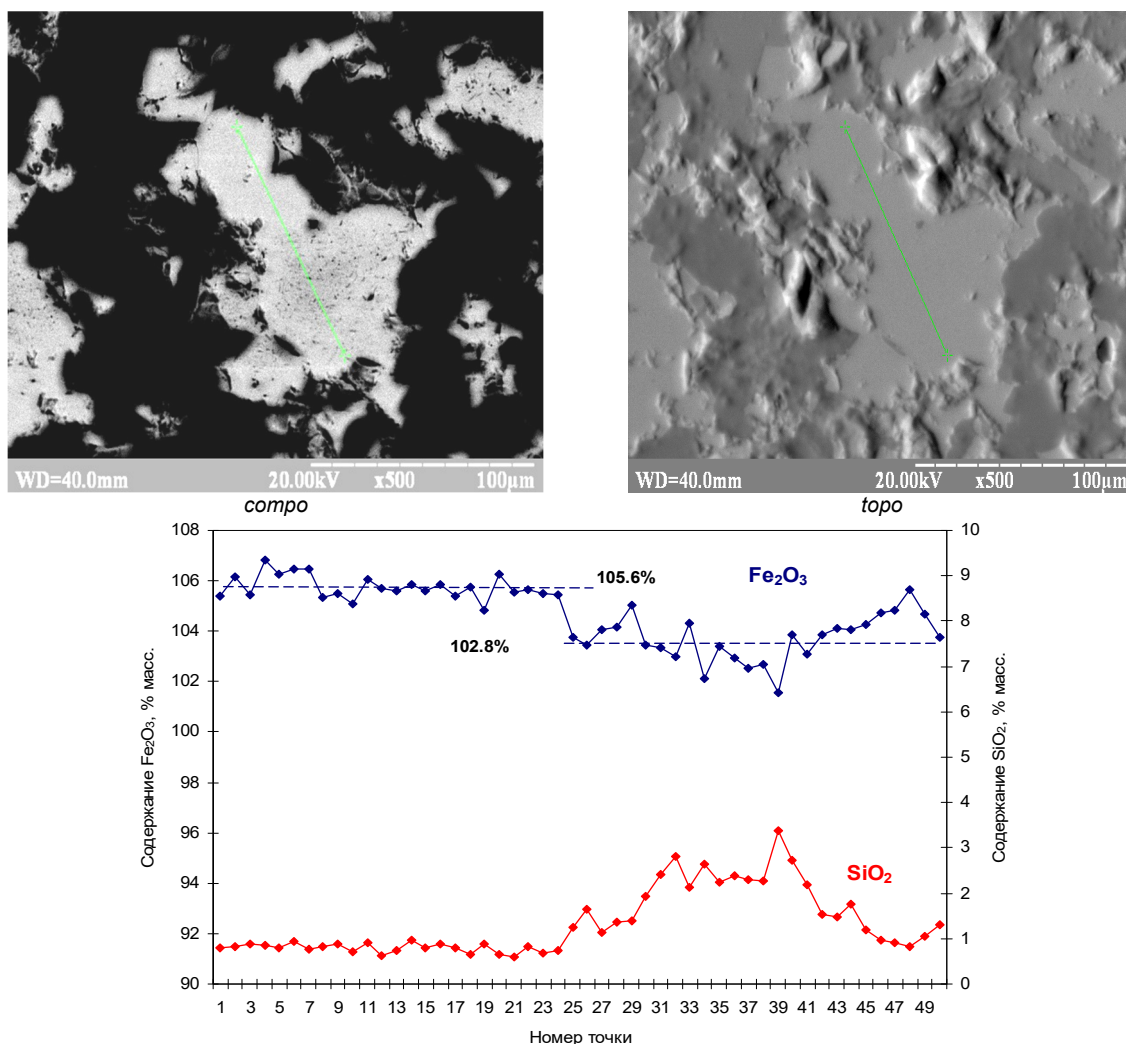


Рис. 7. Типове виокремлення магнетиту складної форми та будови (світло-сіре). У складі матриці переважає кварц (темне). Концентраційний профіль (EMP, крок – 2 мкм) демонструє, що зниження вмісту $\text{Fe}^{\text{total}}_2\text{O}_3$ від "магнетитового" до "гематитового" рівнів супроводжується закономірним зростанням концентрації SiO_2 . У режимі *compo* подібні ділянки відрізняються більш темним кольором та "строкатою" фактурою електронно-мікроскопічного зображення, однак ніяк не відображаються в рельєфі препарату (режим *topo*)

Обговорення результатів. На наш погляд, питання про стадійність переробки корисних копалин (тобто, де закінчується первинна переробка мінеральної сировини) багато в чому зумовлене термінологічною неточністю інструктивних документів. Розглянемо ці питання з урахуванням спеціальної геологічної літератури (Горная энциклопедия, 1984; Коржнев та ін., 2006; Михайлов, Курило, 2015 та ін.).

ПК України (2011) наводить такі визначення термінів "корисна копалина", "мінеральна сировина", "добування корисних копалин":

• П. 14.1.91. **корисні копалини** – природні мінеральні утворення органічного і неорганічного походження у надрах, у т. ч. будь-які підземні води, а також техногенні мінеральні утворення в місцях видалення відходів виробництва та втрат продуктів переробки мінеральної сировини, які можуть бути використані у сфері матеріального виробництва і споживання безпосередньо або після первинної переробки;

• П. 14.1.112. **мінеральна сировина** – товарна продукція гірничого підприємства, що є результатом його господарської діяльності з видобутку корисних копалин, у т. ч. шляхом виконання господарських договорів

про послуги з давальницькою сировиною, і за якісними характеристиками відповідає вимогам установлених законодавством стандартів або вимогам договорів;

• П. 14.1.51. **добування корисних копалин** – сукупність технологічних операцій з вилучення, у т. ч. з покладів дна водойм, та переміщення, у т. ч. тимчасове зберігання, на поверхню частини надр (гірничих порід, рудної сировини тощо), що вміщує корисні копалини.

Додамо, що "корисні копалини" є найбільш широким терміном, який об'єднує всю гаму природних мінеральних утворень, які становлять промисловий інтерес. Вони поділяються на тверді (вугілля, горючі сланці, торф, рудні та нерудні корисні копалини), рідкі (нафта, підземні та мінеральні води) і газові (горючі та інертні гази), за промисловим використанням – на рудні (металічні), нерудні (неметалічні), горючі (каустобіоліти) і газогідромінеральні; за рівнем організації речовини – на породи, мінерали й елементи.

У випадку, що розглядається, корисні копалини представлені залізними рудами. Наведемо визначення терміна "руда": "РУДА – природне мінеральне утворення, що вміщує метали в таких сполуках і концентраціях, за яких їхнє промислове використання технологічно

можливе та економічно доцільне. Рудою називають також деякі види неметалічної сировини (борні, сірчані, баритові, графітові, азбестові руди). Основні властивості руд: вміст цінних і шкідливих компонентів, твердість, міцність, тріщинуватість, пористість, об'ємна вага, температура плавлення; магнітні, електромагнітні, електропровідні, радіоактивні, сорбційні властивості, розчинність тощо. За концентрацією цінних речовин руди можуть бути багатими, рядовими, бідними, за складом – одно- і багатоконпонентними (комплексними), за мінеральним складом і будовою – технологічно легкі для переробки і важкі для збагачення (опірні)" (Михайлов, Курило, 2014).

Отже, руди зазвичай є гірськими породами, збагаченими корисними компонентами, які найчастіше представлені тими чи іншими рудними мінералами (магнетитом і гематитом – для залізних руд, каситеритом для олов'яних руд, галенітом і сфалеритом – для поліметалічних, бастнезитом – для рідкісноземельних і таке інше).

Гірські породи є природними агрегатами мінералів чи аморфної речовини більш-менш постійного складу, що утворюють самостійні геологічні тіла, які складають земну кору, а мінерали – природними твердими, рідше рідкими (самородна ртуть) індивідуальними тілами, природними сполуками певного складу з притаманною їм кристалічною структурою, приблизно однорідними за хімічним складом і фізичними властивостями, що утворюються внаслідок фізико-хімічних процесів на поверхні та в глибинах Землі як складова частина гірських порід і руд.

Отже, породи (руди) і мінерали відповідають різним рівням організації речовини і є якісно різними сполуками. Тому, якщо під час технологічного процесу відбувається перехід порода (руда) → мінерал (концентрат) – це є якісною зміною рудної речовини (мінеральної сировини).

Залізні руди Криворізького басейну є по суті породами, залістим кварцитами, тією чи іншою мірою збагаченими магнетитом та іншими рудними мінералами.

Зазвичай у практиці геологорозвідувальних робіт терміни "руда" і "мінеральна сировина" використовують як синоніми, хоча є певні нюанси їх застосування. Так, для металічних корисних копалин найчастіше використовують термін "руди" (наприклад, залізні руди, поліметалічні руди, рідкісноземельні руди тощо), а для неметалічних – "сировина" (наприклад, каменебарвна сировина, гірничохімічна сировина, абразивна сировина тощо; хоча є й винятки: борні руди, сірчані руди, баритові руди, азбестові руди). Тому визначення ПК мінеральної сировини як "товарної продукції гірничого підприємства" значно обмежує цей термін, бо мінеральною сировиною є всі корисні копалини, у т. ч. і в первинному залеганні. Так, поняття мінерально-сировинної бази України включає всю сукупність корисних копалин, у т. ч. ще не видобутих.

Під час видобутку і дроблення рудничної маси її якісної зміни не відбувається, це ті ж самі породи, залізні руди, вони передроблені до певних розмірів, але зберегли особливості мінерального складу, текстурно-структурні та інші характеристики. Якісних змін мінеральних форм корисних копалин (залізної руди), їх агрегатно-фазового стану, кристалохімічної структури на цій стадії не відбувається.

Інша ситуація зі стадією збагачення. Збагачення є стадією технологічної переробки руд, основною метою якого є отримання концентратів, що відповідають вимогам промисловості, необхідним для їх подальшої металургійної обробки (Курило та ін., 2014). Збагачення корисних копалин – сукупність процесів переробки

твердої мінеральної сировини з метою виділення продуктів (концентратів), придатних для подальшої хімічної чи металургійної переробки або використання (Михайлов, Курило, 2014). Основними способами, що застосовуються для збагачення залізних руд, є гравітаційні, а також магнітна сепарація, флотація, випалювання та їх комбінації (Михайлов та ін., 2007).

Крупність рудних виділень є головним обмежувачем різних методів розділення мінералів. Під час подрібнення руди для її подальшого збагачення фізико-механічними способами зазвичай неможливо забезпечити повне звільнення частинок усіх цінних компонентів. Тому подрібнення виконують до такої крупності, яка визначається передусім економічними міркуваннями. Отже, вибір оптимальної величини подрібнення – завдання досить важливе. Головний метод його вирішення – виявлення характерних мінеральних зростків, що містять цінні компоненти, визначення типових розмірів мінеральних виділень, статистична обробка одержаних даних. Це дає змогу визначити економічно обґрунтовану величину подрібнення, яка завжди значно більша, ніж та, яка потрібна для повного розкриття всіх частинок (Курило та ін., 2014).

Виділяють такі основні види збагачення (Михайлов, Курило, 2014):

- випалювання – метод збагачення, оснований на змінах у мінералах за високої температури (зміни магнітної сприйнятливості, щільності, розтріскування тощо).
- гравітаційне збагачення – метод збагачення, оснований на різній щільності мінералів, що відокремлюються у водному або повітряному середовищі під дією гравітаційних чи відцентрових сил (відсадка, збагачення у важких суспензіях, концентрація на столах, збагачення на шлюзах);
- електрична сепарація – метод збагачення, оснований на відмінності в електричних властивостях (електропровідності, діелектричній проникності, здатності заряджатися при терті) мінералів;
- магнітна сепарація – метод збагачення, оснований на різній магнітній сприйнятливості мінералів;
- радіометричне збагачення – метод збагачення, оснований на різниці в природній та наведеній радіоактивності мінералів;
- рудорозбірка – метод збагачення, оснований на зовнішній відмінності рудної й нерудної речовини, наприклад у кольорі та блиску шматків, що відокремлюються;
- флотаційне збагачення – метод збагачення, оснований на різниці у фізико-хімічних властивостях поверхні мінералів, що відокремлюються.

Аналіз виробничого процесу збагачення магнетитових залістимих кварцитів свідчить про якісні зміни їх характеристик. Відбувається подрібнення сировини з 20 мм до 0,071 мм, яке супроводжується ударами, стисненням, стиранням, розчавленням сировини. За рахунок енергії деформації, зсуву, теплової, кінетичної тощо відбувається не тільки принципова зміна мінерального і хімічного складу речовини, але й часткова перебудова кристалічної ґратки мінералів, порушення хімічних зв'язків, хімічні реакції на поверхні часток (окиснення, гідрогенезація, поглинання газів тощо).

Отже, процес збагачення приводить до якісної зміни стану і мінеральних форм рудної речовини, суттєвих змін текстурно-структурних і мінералогічних характеристик, агрегатно-фазового стану і кристалохімічної структури

окремих мінералів, і, зрештою, її перетворення на якісно інший продукт – концентрат залізорудний магнетитовий.

Треба відзначити, що у випадку збагачення інших типів корисних копалин за подібними схемами (включаючи гравітаційне збагачення) якісні зміни хімічного складу набагато значніші. Так, під час збагачення свинцево-цинкових руд вміст корисних компонентів зростає у десятки разів, руд олова, вольфраму, срібла – у сотні разів, а золота – у тисячі разів. Оскільки процеси збагачення цих руд принципово не відрізняються від збагачення залізистих кварцитів, можна стверджувати, що процес первинної обробки рудної мінеральної сировини закінчується на стадії дроблення, а процеси збагачення приводять до появи якісно нового продукту, який вже не є рудою (мінеральною сировиною).

Виходячи з цих міркувань, можна констатувати, що на першій стадії виробничого процесу ГЗК Криворіжжя (видобуток руди сировинної магнетитової) підприємства отримують товарну продукцію у вигляді руди або мінеральної сировини; на другій стадії (дроблення) відбувається її первинна переробка, але глибинних якісних перетворень мінеральної речовини не відбувається. На третій стадії (глибоке збагачення), навпаки, відбуваються суттєві якісні перетворення речовини, коли гірська порода (руда, мінеральна сировина) перетворюється на новий продукт – магнетитовий концентрат, який за своїми характеристиками (організація речовини, мінеральний склад, хімічний склад, структурно-текстурні особливості, агрегатно-фазовий стан, кристалохімічна структура і т. ін.) суттєво відрізняється від первинного матеріалу (гірської породи чи руди).

Докази глибинного якісного перетворення рудної речовини залізних руд Криворізького басейну в процесі збагачення наводяться в численних літературних джерелах.

Так, у монографії *(Железисто-кремнистые..., 1989)* відмічається, що вже в процесі тонкого подрібнення (мелення) (44 мкм) відбувається суттєва зміна морфології, гранулометрії і конституції мінералів, аж до появи новоутворених фаз, підвищується дефектність структур магнетиту, зокрема, точки Кюрі збільшуються на 10–20°С порівняно з природними, з'являється новоутворений магнетит, утворюється мартит. Під впливом механічних навантажень у процесі дроблення відбуваються локальні зміни хімічного складу мінералів, так, за рахунок подрібнення магнетиту, який вміщує магнетит, відбувається його окиснення, що пов'язано зі збільшенням вмісту магнетиту і мартиту.

За даними *(Тарасенко, 2000)*, під час тонкого подрібнення (менше 44 мкм) відбувається зміна природної морфології, конституції і гранулометрії мінералів, поява новоутворених фаз, проявляються явища аморфізації, поліаморфізації, псевдоморфізації мінералів, збільшується дефектність структур магнетиту, з'являється новоутворений магнетит, що збільшує гетерогенність окиснення магнетиту до магнетиту і надалі – до мартиту. Під час тонкого подрібнення вторинного гематиту-мартиту відбувається зміна хімічного складу продуктів, так, в класі -0,074 +0,05 мм зменшується вміст заліза магнітного з 31,7 % до 29,7 %, і збільшується вміст заліза немагнітного з 13,4 % до 14,9 %, а для класу -0,05 мм вміст заліза магнітного зменшується з 54,4 % до 45,6 %, а заліза немагнітного збільшується з 10,9 % до 19,4 %. Отже, при подрібненні відбувається не тільки диспергування і розкриття зростків мінералів, але й зміна їх кристалічної структури і енергетичного стану поверхонь зерен, виникнення новостворених

фаз, а під час магнітної сепарації – перебудова доменних структур часток мінеральних індивідів.

Згідно з Податковим кодексом України (2011), ст. 252.3 "Об'єктом оподаткування рентною платою за користування надрами для видобування корисних копалин по кожній наданій у користування ділянці надр, що визначена у відповідному спеціальному дозволі, є обсяг товарної продукції гірничого підприємства – видобутої корисної копалини (мінеральної сировини), що є результатом господарської діяльності з видобування корисних копалин у податковому (звітному) періоді, приведеної у відповідність із стандартом, встановленим галузевим законодавством...", а базою оподаткування рентною платою за користування надрами для видобування корисних копалин (ст. 252.6) – "...вартість обсягів видобутих у податковому (звітному) періоді корисних копалин (мінеральної сировини), яка окремо обчислюється для кожного виду корисної копалини (мінеральної сировини) для кожної ділянки надр на базових умовах поставки (склад готової продукції гірничого підприємства)".

Оскільки процес глибинної переробки на збагачувальній стадії роботи ГЗК Криворіжжя не є видобутком корисних копалин, то продукти цієї переробки не підпадають під вимоги Податкового кодексу України і не можуть слугувати об'єктом оподаткування рентною платою за користування надрами для видобування корисних копалин.

Висновки. Враховуючи вищесказане, ми дійшли таких висновків.

1. Якісні зміни мінеральних форм корисних копалин (залізної руди), їх агрегатно-фазового стану, кристалохімічної структури під час виробничих процесів не відбуваються на добувному і дробильному виробництвах, але відбувається на збагачувальному виробництві ГЗК Криворіжжя.

2. Якісні зміни мінеральних форм корисних копалин (залізної руди), їх агрегатно-фазового стану, кристалохімічної структури відбуваються під час процесу збагачення руди при виробництві концентрату на рудозбагачувальних фабриках ГЗК Криворіжжя. Вони починаються вже на стадії подрібнення (мелення) і класифікації і посилюються на стадії мокрої магнітної сепарації, дешламації і зневоднення.

3. З урахуванням вимог Податкового кодексу України (визначення первинної переробки) та інформації про технологічні цикли ГЗК Криворіжжя первинна переробка корисних копалин для цілей оподаткування рентною платою завершується на етапі дробильного виробництва, де відбувається дроблення рудної речовини без якісної зміни мінеральних форм корисних копалин, їх агрегатного стану, кристалохімічної структури.

Для остаточного вирішення питання щодо зміни мінеральних форм, агрегатно-фазового стану, кристалохімічної структури і інших перетворень мінеральної речовини на всіх стадіях виробничого процесу пропонується проведення комплексу лабораторно-аналітичних досліджень (мінераграфічні, петрографічні, електронно-мікроскопічні дослідження, визначення вмісту всіх головних елементів і мікроелементів, рентгенодифракційний аналіз, електронно-зондовий та інші види аналізів тощо), які науково обґрунтують межі первинної переробки мінеральної сировини, що поставить крапку на питанні визначення бази оподаткування користування надрами для видобування корисних копалин.

Подяки. Автори вдячні ст. наук. співроб. **О.В. Андрееву** за істотну допомогу у виконанні великого обсягу електронно-зондових досліджень.

Список використаних джерел

- Белевцев, Я.Н., Белевцев, Р.Я. (1981). Геологическое строение и железные руды Криворожского бассейна. К.: Наук. думка.
- Гірничий закон України. (1999). *Відомості Верховної Ради України*, 50, 433.
- Горная энциклопедия. (1984). В 5 томах. Ред. Е.А. Козловский. М.: Сов. энциклопедия.
- Гурський, Д.С., Єсипчук, К.Ю., Калінін, В.І. та ін. (2006). Металічні і неметалічні корисні копалини України. Т. І. Металічні корисні копалини. К.; Л.: "Центр Європи".
- Державна геологічна карта України. (2005). М-6 1:200 000. Централь-ноукраїнська серія. Аркуші: М-36-XXXIV (Жовті Води), L-36-IV (Кривий Ріг). Пояснювальна записка. К.: УкрДГРІ.
- 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-Кременчузької зони. К.: Ніка-центр.
- Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Минералогия. (1989). Ред. Я.Н. Белевцев. К.: Наукова думка.
- Класифікація запасів і ресурсів корисних копалин Державного фонду надр. (1997). Затверджено постановою Кабінету Міністрів України № 432 від 05.05.97. *Офіційний вісник України*, 19, 104.
- Кодекс України "Про надра" від 27.07.1994 р. № 132/94. (1994). *Відомості Верховної Ради України*, 36, 340.
- Коржнев, М.М., Михайлов, В.А., Міщенко, В.С., Плотников, О.В., Шумлянский, В.О., Курило, М.М., Сухина, О.М. (2006). Основы экономической геологии. Навчальний посібник. К.: Логос.
- Куделя, А.Д. (1984). Комплексное использование минеральных ресурсов железорудных горно-обогатительных комбинатов УССР. К.: Наукова думка.
- Кулиш, Е.А., Плотников, А.В. (2005). Геологические факторы экономической ценности железорудных месторождений. К.: Логос.
- Курило, М.В., Михайлов, В.А., Дубина, О.В. (2014). Мінерографія. Підручник. К.: Київський університет.
- Лазаренко, Е.К., Гершойг, Ю.Г., Бучинская, Н.И. и др. (1977). Минералогия Криворожского бассейна. К.: Наук. думка.
- Латиш, І.К. (2003). Рудні мінерали та їх діагностика. К.: "АртЕк".
- Маковський, О. Павлишин, В., Сливко, Є. (2009). Основы минералогії України. Підручник. Львів: ВЦ ЛНУ ім. Ів. Франка.
- Михайлов, В.А., Курило, М.М. (2015). Базові терміни і поняття економічної геології. Навчальний посібник. К.: Київський університет.
- Михайлов, В.А., Шевченко, В.І., Огар, В.В., Курило, М.В., Шунько, В.В., Грінченко, О.В., Омелчук, О.В., Михайлова, Л.С. (2007). Металічні корисні копалини України. Підручник. К.: Київський університет.
- Павлишин, В.І., Довгий, С.О. (2008). Минералогия. К.: КНТ.
- Павлишин, В.І., Маковський, О. І., Довгий, С.О. (2007). Генезис мінералів. Підручник. К.: КНТ.
- Податковий кодекс України. (2011). *Відомості Верховної Ради України*, 13, 13–14, 15–16, 17. Отримано з <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>
- Положення про Державну службу геології та надр України, затверджене Постановою КМУ від 30 грудня 2015 р. № 1174. (2015).
- Про затвердження Положення про порядок організації та виконання дослідно-промислової розробки родовищ корисних копалин загальнодержавного значення. (2003). Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України № 34/м від 3 березня 2003 р. *Офіційний вісник України*, 21, 976.
- Рудько, Г.І., Плотников, О.В., Радванов, С.В. (2013). Геологія окислених кварцитів залізних родовищ Криворізького басейну. Чернівці: Букрек.
- Рудько, Г.І., Плотников, О.В., Курило, М.М., Радванов, С.В. (2010). Економічна геологія родовищ залізистих кварцитів. К.: Академпрес.
- Рудько, Г.І., Плотников, О.В., Радванов, С.В. (2012). Геолого-економічна оцінка окислених залізистих кварцитів в залізисто-кременистих формаціях докембрію Українського щита. Київ-Чернівці: Букрек.
- Смірнов, О.Я., Євтехов, Є.В., Євтехов, В.Д. (2010). Геологічна позиція і морфологія покладів гематитових кварцитів Валявкінського родовища Криворізького басейну. *Геолого-мінералогічний вісник*, 1-2 (23-24), 17-29.
- Смірнов, О.Я., Євтехов, Є.В., Євтехов, В.Д. (2012). Минералогічна неоднорідність покладів гематитових кварцитів Криворізького басейну (на прикладі Валявкінського родовища). *Геолого-мінералогічний вісник Криворізького технічного університету*, с. 22-27. Отримано з <http://nbuv.gov.ua> > j-pdf > vdugg_2012_20_14_6
- Тарасенко, В.Н. (2000). Краткий курс прикладной минералогии. Учебное пособие. Кривой Рог: Минерал.
- Юшко, С.А. (1984). Методы лабораторного исследования руд. М.: Недра.

Юшко, С.А., Юшко-Захарова, О.Е., Лебедева, С.И., Максимюк, Н.Е. (1975). Диагностические свойства рудных минералов. М.: Недра.

References

- Belevtsev, Ya.N., Belevtsev, R.Ya. (1981). Geological structure and iron ores of the Kryvyi Rih basin. K.: Nauk. dumka.
- Classification of reserves and resources of minerals of the State Fund of Subsoil. (1997). Approved by the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 432 of 05.05.97. *Official Gazette of Ukraine*, 19, 104.
- Code of Ukraine "On Subsoil" of July 27, 1994 № 132/94. (1994). *Information of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 36, 340.
- Dovgy, S.O., Korzhnev, M.M., Trofimchuk O.M. et al. (2017). Geological structure and modern geological, economic and ecological conditions of iron ore mining and processing in the Kryvyi Rih-Kremenchug zone. K.: Nika-center.
- Gursky, D.S., Yesipchuk, K.Yu., Kalinin, V.I. et al. (2006). Metallic and non-metallic minerals of Ukraine. V. I. Metallic minerals. K.; L.: "Center of Europe".
- Iron-siliceous formations of the Precambrian of the European part of the USSR. Mineralogy. (1989). Edited by J.N. Belevtsev. K.: Nauk. dumka.
- Korzhnev, M.M., Mykhailov, V.A., Mishchenko, V.S., Plotnikov, O.V., Shumlyansky, V.O., Kurilo, M.M., Sukhina, O.M. (2006). Fundamentals of economic geology. Textbook. K.: Logos.
- Kudelya, A.D. (1984). Integrated use of mineral resources of iron ore mining and processing plants of the USSR. K.: Nauk. dumka.
- Kulish, E.A., Plotnikov, A.V. (2005). Geological factors of economic value of iron ore deposits. K.: Logos.
- Kurilo, M.V., Mykhailov, V.A., Dubina, O.V. (2014). Mineragraphy. Textbook. K.: University of Kyiv.
- Latysh, I.K. (2003). Ore minerals and their diagnosis. K.: "ArtEk".
- Lazarenko, E.K., Gershoig, Yu.G., Buchinskaya, N.I. et al. (1977). Mineralogy of the Kryvyi Rih basin. K.: Nauk. dumka.
- Makovsky, O., Pavlyshyn, V., Slivko, E. (2009). Fundamentals of mineralogy of Ukraine: textbook. Lviv: VC LNU im. Iv. Franka.
- Mining encyclopedia. (1984). In 5 volumes. Edited by E.A. Kozlovsky. M.: Sov. encyclopedia.
- Mining law of Ukraine. (1999). *Information of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 50, 433.
- Mykhailov, V.A., Kurilo, M.M. (2015). Basic terms and concepts of economic geology. Textbook. K.: Kyiv University.
- Mykhailov, V.A., Shevchenko, V.I., Ogar, V.V., Kurilo, M.V., Shunko, V.V., Grinchenko, O.V., Omelchuk, O.V., Mykhailova, L.S. (2007). Metallic minerals of Ukraine. Textbook. K.: University of Kyiv.
- On approval of the Regulations on the procedure for organization and implementation of research and industrial development of mineral deposits of national importance. (2003). Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine № 34 / m of March 3, 2003. *Official Gazette of Ukraine*, 21, 976.
- Pavlyshyn, V.I., Dovgy, S.O. (2008). Mineralogy. K.: KNT.
- Pavlyshyn, V.I., Makovsky, O.I., Dovgy, S.O. (2007). Genesis of minerals. Textbook. K.: KNT.
- Regulations on the State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of December 30, 2015 № 1174. (2015).
- Rudko, G.I., Plotnikov, O.V., Kurilo, M.M., Radovanov, S.V. (2010). Economic geology of iron quartzite deposits. K.: Academpress.
- Rudko, G.I., Plotnikov, O.V., Radovanov, S.V. (2012). Geological and economic assessment of oxidized ferruginous quartzites in ferruginous-siliceous formations of the Ukrainian Shield Precambrian. Kyiv-Chernivtsi: Bukrek.
- Rudko, G.I., Plotnikov, O.V., Radovanov, S.V. (2013). Geology of oxidized quartzites of iron ore deposits of the Kryvyi Rih basin. Chernivtsi: Bookrek.
- Smirnov, O.Ya., Evtekhov, E.V., Evtekhov, V.D. (2010). Geological position and morphology of hematite quartzite deposits of the Valyavkin deposit of the Kryvyi Rih basin. *Geological and mineralogical bulletin*, 1-2 (23-24), 17-29.
- Smirnov, O.Ya., Evtekhov, E.V., Evtekhov, V.D. (2012). Mineralogical inhomogeneity of hematite quartzite deposits of the Kryvyi Rih basin (on the example of the Valyavkin deposit). *Geological and Mineralogical Bulletin of Kryvyi Rih Technical University*, p. 22-27. Retrieved from <http://nbuv.gov.ua> > j-pdf > vdugg_2012_20_14_6
- State geological map of Ukraine. (2005). MB 1: 200 000. Central Ukrainian series. Sheets: M-36-XXXIV (Yellow Waters), L-36-IV (Kryvyi Rih). Explanatory note. K.: UkrDGR.
- Tarasenko, V.N. (2000). A short course in applied mineralogy. Textbook. Krivoy Rog: Mineral.
- Tax Code of Ukraine (2011). *Information of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 13, 13–14, 15–16, 17. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>
- Yushko, S.A. (1984). Methods of laboratory research of ores. M.: Nedra.
- Yushko, S.A., Yushko-Zakharova, O.E., Lebedeva, S.I., Maksimyk, N.E. (1975). Diagnostic properties of ore minerals. M.: Nedra.

Надійшла до редколегії 05.10.21

V. Mikhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vladvam@gmail.com;
S. Shniukov, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: shnyukov54@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
A. Kostruba, Dr. Sci. (Law), Prof.,
E-mail: anatolii.kostruba@pnu.edu.ua,
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk,
57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018 Ukraine;
T. Kharytonova, Dr. Sci. (Law), Prof.,
E-mail: haritonova@onua.edu.ua;
K. Hryhorieva, Dr. Sci. (Law), Assoc. Prof.,
E-mail: gergina8888@gmail.com;
National University "Odesa Law Academy",
23 Fontanska Road, Odesa, 65009 Ukraine;
M. Tkalych, PhD (Law), Assoc. Prof.,
E-mail: maxx.tkalich@gmail.com,
Zaporizhzhia National University,
66 Zhukovskoho Str., Zaporizhzhia, 69000 Ukraine

LEGAL ASPECTS OF IRON ORE PROCESSING IN THE KRYVYI RIH IRON ORE BASIN

The current version of the Tax Code allows for misinterpretation of the interpretation of the term "primary processing of mineral resources". In particular, the tax authorities believe that the primary processing of mineral raw materials includes magnetite concentrate, which in this case is subject to taxation. That is, a number of mining and processing enterprises have faced the problem of double taxation, which threatens significant financial losses. Accordingly, this led to the choice of topic for writing this article, the purpose of which is to conduct research on changes in mineral forms of minerals (iron ore), their aggregate-phase state, crystal chemical structure during production processes at mining, crushing and concentrating production of Kryvyi Rih mining and processing enterprises, and establishing at what stage of production the primary processing of minerals for the purposes of rent taxation is completed and whether the position of enterprises on limiting primary processing by the stage of fragmentation meets the requirements of the Tax Code of Ukraine.

Keywords: Tax code, subsoil use, double taxation, mineral resources, iron ore basin.

В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vladvam@gmail.com;
С. Шнюков, д-р геол. наук, доц.,
E-mail: shnyukov54@gmail.com;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
А. Коструба, д-р юрид. наук, проф.,
E-mail: anatolii.kostruba@pnu.edu.ua,
Прикарпатский национальный университет им. Василя Стефаника,
ул. Шевченко, 57, г. Ивано-Франковск, 76018, Украина;
Т. Харитоновна, д-р юрид. наук, проф.,
E-mail: haritonova@onua.edu.ua;
Х. Григорьева, д-р юрид. наук, доц.,
E-mail: gergina8888@gmail.com;
Национальный университет "Одесская юридическая академия",
Фонтанская дорога, 23, г. Одесса, 65009, Украина;
М. Ткалич, канд. юрид. наук, доц.,
E-mail: maxx.tkalich@gmail.com,
Запорожский национальный университет,
ул. Жуковского, 66, г. Запорожье, 69000, Украина

ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД КРИВОРОЖСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО БАСЕЙНА

Действующая редакция Налогового кодекса допускает разночтения в трактовке термина "первичная переработка минерального сырья". В частности, налоговые органы считают, что первичная переработка минерального сырья включает магнетитовый концентрат, который в таком случае подлежит налогообложению. То есть ряд обоганительных предприятий столкнулись с проблемой двойного налогообложения, что грозит значительными финансовыми потерями. Соответственно, это обусловило выбор темы для написания этой статьи, целью которой является проведение научного исследования изменения минеральных форм полезных ископаемых (железной руды), их агрегатно-фазового состояния, кристаллохимической структуры при производственных процессах на добывающем, дробильном и обоганительном производстве горно-обоганительных предприятий Криворожья, и установления, на каком именно этапе производства завершается первичная переработка полезных ископаемых для целей налогообложения рентной платой, и соответствует ли позиция предприятий по ограничению первичной переработки стадией дробления требованиям Налогового кодекса Украины.

Ключевые слова: налоговый кодекс, недропользование, двойное налогообложение, минеральное сырье, железо-рудный бассейн.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 504.5(556.047)](477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.11>

О. Шпак, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: shpak_lena@yahoo.com;

Р. Гаврилюк, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: gavrilyuk.ruslan@gmail.com;

О. Логвиненко, мол. наук. співроб.,

E-mail: lohvyenko.olha@gmail.com;

Інститут геологічних наук НАН України,

вул. О. Гончара, 55-Б, м. Київ, 01054, Україна

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕМЕДІАЦІЇ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА
НА ТЕРИТОРІЇ СКЛАДУ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ
АЕРОПОРТУ "БОРИСПІЛЬ"***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)*

Присвячено актуальній проблемі ремедіації геологічного середовища, забрудненого нафтопродуктами. Забруднення геологічного середовища нафтопродуктами на території складу аеропорту "Бориспіль" у вигляді лінзи авіаційного гасу існує тривалий час. Відновлювальні роботи з вилучення мобільних нафтопродуктів та забруднених ґрунтових вод, що проводились на ділянці досліджень, не дозволили повністю ліквідувати забруднення. Щоб визначити ефективність ліквідаційних відкачок мобільних нафтопродуктів та ґрунтових вод, було оцінено обсяг і стан нафтопродуктів у ґрунті та їхню трансформацію під впливом коливання рівня ґрунтових вод. За розробленою нами методикою розраховане мінімальне значення потужності шару нафтопродуктів у свердловині, за якого мобільні нафтопродукти в ґрунті відсутні, і ліквідаційні відкачки стають неефективними. За даними моніторингу та розрахунків обсягу гасу в лінзі, ліквідаційні відкачки на забрудненій ділянці привели до стабілізації поширення забруднення і скорочення площі лінзи авіаційного гасу.

Ключові слова: ремедіація, геологічне середовище, забруднення, нафтопродукти, ліквідаційні відкачки.

Постановка проблеми. Ремедіація забрудненого нафтопродуктами (НП) геологічного середовища є проблемою світового масштабу і одним із пріоритетних напрямів геоecологічної діяльності в Україні. На території України існують численні осередки забруднення геологічного середовища НП, які виступають стійким чинником погіршення екологічної ситуації протягом останніх десятиліть (Огняник та ін., 2002; Shpak et al., 2003). Особливо небезпечним є вплив НП-забруднення на якість підземних вод – джерела питного водопостачання. Поширення НП-забруднення у геологічному середовищі супроводжується негативними змінами довкілля, що можуть бути невідворотними протягом десятиків, а можливо і сотень років. За значних масштабів забруднення на поверхні ґрунтових вод формуються лінзи мобільних НП, які необхідно вилучити відкачкою, щоб обмежити подальше поширення забруднення. Досвід закордонних спеціалістів та досліджень, проведених в ІГН НАНУ на забруднених НП ділянках, свідчить про те, що ліквідаційні відкачки без застосування інших додаткових методів ремедіації не завжди дозволяють відновити забруднене геологічне середовище до потрібних стандартів якості (Огняник та ін., 2013; Abdul, 1992; Newell et al., 1995; Testa, Paczkowski, 1989; U.S.EPA, 2005).

Показовим об'єктом є територія складу паливно-мастильних матеріалів (ПММ) аеропорту "Бориспіль" (Київська обл.), де забруднення геологічного середовища НП у вигляді лінзи авіаційного гасу існує з 1998 р. Відновлювальні роботи з вилучення мобільних НП та забруднених ґрунтових вод, що проводились на ділянці досліджень, не дозволили повністю ліквідувати забруднення. За даними моніторингу було підтверджено наявність шару гасу майже у всіх ліквідаційних свердловинах. Виникає необхідність визначення ефективності ліквідаційних відкачок на забрудненій ділянці та доцільності їх подальшого застосування.

Аналіз публікацій за темою досліджень. У зв'язку з глобальним поширенням забруднення геологічного

середовища НП, починаючи з 70-х років минулого століття вченими-гідрогеологами у багатьох країнах, і в першу чергу у США, низка наукових досліджень була присвячена розробці методів ремедіації забруднених НП ґрунтів та підземних вод (National Research Council, 1994; Newell et al., 1995; Manual, 1992). Існує ряд публікацій, в яких описано застосування ліквідаційних відкачок для відновлення забрудненого НП геологічного середовища (Кржиж і Резник, 2007; Abdul, 1992; Charbeneau et al., 2000; U.S.EPA, 2005). Однак в Україні систематичні спеціалізовані дослідження та регулярний моніторинг осередків забруднення практично не проводяться. На забруднених НП ділянках ремедіаційні заходи переважно здійснюють приватні підприємства на засадах самофінансування, і при зниженні показників ремедіації до рівня "рентабельності" відновлювальні роботи можуть бути припинені, навіть якщо головна мета – усунення загрози об'єктам, які можуть зазнавати забруднення, не досягнута. Слід зауважити, що кількість публікацій із цієї теми з практичними прикладами застосування методів ремедіації забрудненого НП геологічного середовища в Україні є незначною.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Статтю присвячено висвітленню особливостей застосування ліквідаційних відкачок для відновлення забрудненого НП геологічного середовища. Слід відзначити досить складні еколого-гідрогеологічні умови об'єкта досліджень, пов'язані з впливом коливання рівня ґрунтових вод (РґВ) та недостатньо ефективними попередніми відновлювальними роботами, що потребує проведення регулярного моніторингу осередку забруднення, визначення стану та об'єму знаходження НП в ґрунті та їх трансформації в процесі коливання РґВ та застосування нових підходів до ремедіації геологічного середовища.

Мета досліджень – оцінка ефективності та доцільності подальшого застосування ліквідаційних відкачок на забрудненій ділянці складу ПММ аеропорту "Бориспіль".

© Шпак О., Гаврилюк Р., Логвиненко О., 2022

У статті наведено результати досліджень відділу охорони підземних вод ІГН НАНУ, що проводились на забрудненій ділянці складу ПММ аеропорту "Бориспіль", включаючи моніторинг осередку забруднення, визначення вмісту НП у пробах води та ґрунту, оцінку об'єму і стану знаходження НП в ґрунті та їх трансформації під впливом коливання РГВ.

Визначення ефективності ліквідаційних робіт на забрудненій ділянці. Забруднення геологічного середовища НП в районі складу ПММ аеропорту "Бориспіль" у вигляді лінзи авіаційного гасу було виявлено у 1998 р. У результаті витоків НП відбувалось їх просочування в зону аерації, представлену проникними лесоподібними та алювіальними супісками і пісками, та подальша інфільтрація у напрямку ґрунтових вод. Потужність шару НП у свердловинах сягала 0,9 м, сумарний об'єм НП, які накопичилися на поверхні ґрунтових вод, складав 1 725 м³.

У 1999–2000 рр. було розроблено проєкт вилучення підземних вод, забруднених НП, та пробурено мережу з 42 ліквідаційних свердловин. Однак виконані відновлювальні роботи не дозволили повністю ліквідувати забруднення. Це пов'язано з недостатньою кількістю ліквідаційних свердловин, щоб покрити всю область забруднення, і відстанями між свердловинами, що суттєво

перевищували радіус впливу свердловин. Результати математичного моделювання з імітації роботи ліквідаційних свердловин свідчать, що за потужності лінзи гасу 0,5 м свердловини мають розміщуватись за сіткою не рідше ніж 20х20 м (*Шпак та ін.*, 2020), що не було забезпечено існуючою системою.

У 2011 р. ІГН НАН України розпочато дослідження осередку забруднення ділянки складу ПММ. На початковому етапі досліджень (серпень 2011 р.) моніторинговими даними було підтверджено наявність шару гасу майже у всіх ліквідаційних свердловинах. Аналогічні дані отримані за станом на вересень 2015 р. (рис. 1).

За час проведення ліквідаційних робіт на осередку забруднення (2001–2019 рр.) було вилучено та очищено 35 267 м³ забрудненої води та 353,81 м³ мобільних НП (рис. 2). Максимальний ефект спостерігався в перші три роки (2001–2003 рр.), протягом яких було вилучено 281,96 м³ НП – 79,7 % від загальної кількості вилучених НП. У 2003–2019 рр. було вилучено 71,84 м³ НП – 20,3 % від загальної кількості вилучених НП. У цей період річний видобуток НП коливався в межах від 0,6 % до 1,7 % (2–6 м³) від сумарної кількості. Об'єм вилученого нафтопродукту становить 20 % від розрахованого на доліквідаційному етапі.

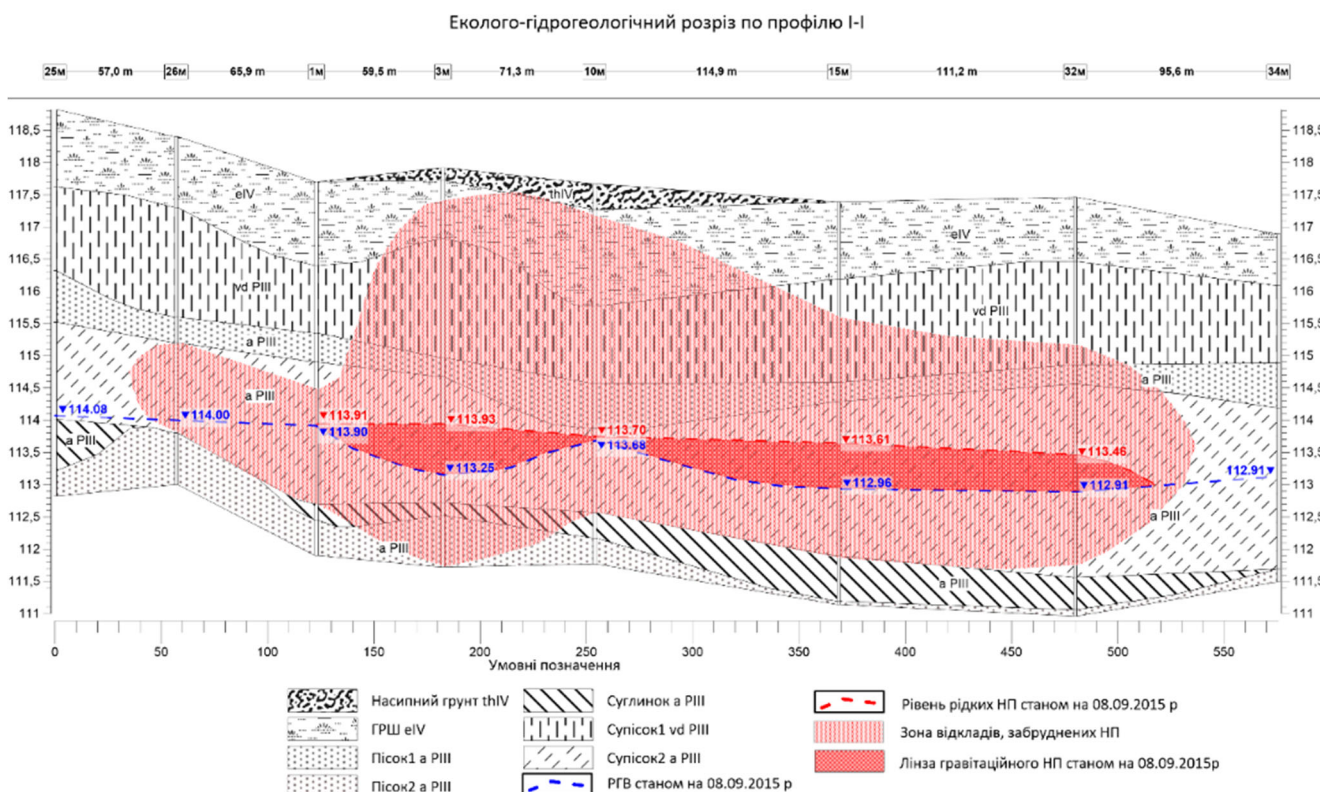


Рис. 1. Еколого-гідрогеологічний розріз забрудненої ділянки складу ПММ

У 2019 р. ліквідаційні відкачки було призупинено у зв'язку з досягнутою мінімізацією загрози поширення забруднення (шар мобільних НП у спостережних свердловинах суттєво зменшився або зовсім зник). Однак залишається загроза забруднення через втрати НП з трубопроводів.

Для визначення ефективності ліквідаційних робіт шляхом відкачок мобільних НП та ґрунтових вод необхідно оцінити об'єм і стан знаходження НП у ґрунті та їх трансформацію в процесі коливання РГВ.

Розрахунки проводились за розробленою нами методикою, яка була застосована на забруднених НП територіях військових аеродромів України (*Огняник та ін.*, 2013).

Потужність шару мобільних НП у відкладах T пов'язана з потужністю НП у свердловині T^w рівнянням

$$T^w = T + \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}, \quad (1)$$

де h_d^{ao} – напір зміщення ЛНП в повітря; $\rho_{r,o} = \rho_o / \rho_w$ – відносна питома вага ЛНП: $\rho_{r,o} = 0,8/1 = 0,8$.

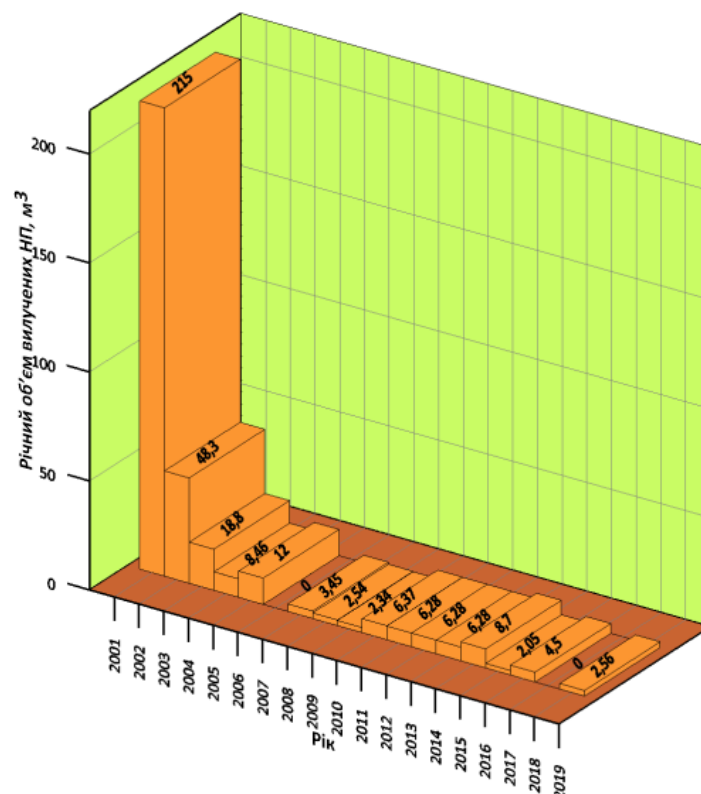


Рис. 2. Динаміка об'єму вилучених НП на забрудненій ділянці складу ПММ

З формули (1) виходить, що при $T = 0$

$$T^w = \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,0}} \quad (2)$$

Для визначення мінімального значення T^w , за якого існує зв'язок між потужністю шару мобільного газу у свердловині і ґрунті необхідно знайти

$$h_d^{ao} = \frac{h_d^{aw} \sigma_{ao}}{\sigma_{aw}} \quad (3)$$

де $\sigma_{aw} = 72$ дін/см – поверхневий натяг у системі флюїдів "повітря – вода"; $\sigma_{ao} = 24,55$ дін/см – поверхневий натяг у системі флюїдів "повітря – газ"; h_d^{aw} розраховується за формулою

$$h_d^{aw} = \alpha^{-1} S_x^{1/\lambda} (S_x^{-1/m} - 1)^{1-m} \quad (4)$$

$$\text{де } S_x = 0,72 - 0,35e^{-\varepsilon^4}, \lambda = \frac{m(1-0,5^{1/m})}{1-m} \quad (5)$$

$\alpha = 0,04$ 1/см; $\varepsilon = 1,296$; $m = 1 - 1/\varepsilon = 0,228$, отримані екстраполяцією рівнянням Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) експериментальних вимірів "вміст води (θ_w) – капілярний напір h_{aw} на зразках ґрунту з дослідного об'єкта. Після підстановки значень: α , ε , m отримано, що $h_d^{aw} = 21,16$ см, а згідно з рівнянням (3) – $h_d^{ao} = 7,215$ см. Підставивши це значення у формулу (2), отримуємо, що мінімальне значення потужності шару ЛНП у свердловині, за якого зникає мобільний газ в ґрунті, становить $T^w = 36,08$ см.

Отже, за відсутності впливу процесів коливання РГВ товщина шару НП у свердловині, за якої можна очікувати наявність шару мобільних НП у відкладах, становить $T^w \approx 0,36$ м, тому за таких показників ліквідаційні заходи не мають сенсу.

Вплив коливання РГВ на зміну потужності шару НП у ґрунті та спостережній свердловині. У результаті коливання рівнів ґрунтових вод (РГВ) відбуваються

процеси, які призводять до збільшення зони забруднення ґрунтів та концентрації НП у них. Під час підйому рівня ґрунтових вод потужності шару газу в свердловині і мобільного газу у відкладах зменшуються. Газ витрачається на формування нового мобільного шару і капілярних зон "повітря–НП–вода" та "НП–вода", збільшуючи заземлену водою частку. Наступні висхідні і низхідні рухи збільшують багаторічний максимум амплітуди коливань РГВ, що призводить до "розмазування" газу в її межах. Тому на формування мобільної фази витрачається все менше і менше газу.

Коливання РГВ безпосередньо впливають на результативність ліквідаційних відкачок НП, зменшуючи їх ефективність. Ці процеси дуже добре спостерігаються на дослідному об'єкті.

За період спостережень шар вільного газу майже зникає при підйомах РГВ і відновлюється при їх зниженні. При цьому відбувається додаткове забруднення зони аерації, оскільки при кожному підйомі РГВ та рівня газу формується нова капілярна зона. Так, у червні 2014 р. спостігалось найбільше підняття рівнів за весь період спостережень, що призвело до значного скорочення шару вільного газу або його зникнення у спостережних свердловинах, тобто його перехід у заземлений стан. За період з 11.09.2012 по 12.06.2014 р. шар НП зменшився у більше ніж 3 рази. Наприклад, у свердловині 15 потужність газу зменшилась з 1,07 до 0,20 м, тобто в 5,35 рази (рис. 3). Під час подальшого зниження РГВ шар НП відновлювався, але не повною мірою. Найбільше його відновлення (потужність) спостігалась у вересні 2016 р. за найбільш низьких положень РГВ за час моніторингових спостережень і становила у св. 15 м – 0,93 м, або 83 % від максимальної потужності у 2012 р. Близько 13 % НП залишились захопленими ґрунтом. Такі ж закономірності підтверджуються даними інших свердловин. Найбільші потужності мобільних НП спостігались на відмітках

113–114,2 м, імовірно, на цих глибинах і формувався основний об'єм лінзи НП. Під час наступних піднятів рівнів потужності гасу зменшуються.

За час спостережень багаторічна амплітуда коливань РГВ становила 2,4 м. Зона забруднення також перебуває в цих межах, шар вільного НП, що відновлюється, – в межах відміток 112,5–114,5 м. У результаті коливань РГВ відбувається "розмазування" НП по зоні аерації і забруднення додаткового об'єму ґрунту.

У період 2012–2015 рр. у зв'язку з поступовим зниженням РГВ шар НП дещо відновлювався.

Якщо враховувати коливання РГВ, які спостерігалися протягом 2011–2020 рр., можливість вилучення мобільних НП була лише в окремі періоди: за товщини шару НП понад 0,36 м. Шар мобільних НП у ґрунті спостерігався протягом 2012, 2014–2017 рр. та у 2019 р. У період з жовтня 2013 р. по жовтень 2014 р. та у 2018 р. НП переходив у защемлений стан у результаті підйому рівня ґрунтових вод і майже не фіксувався спостережними свердловинами.

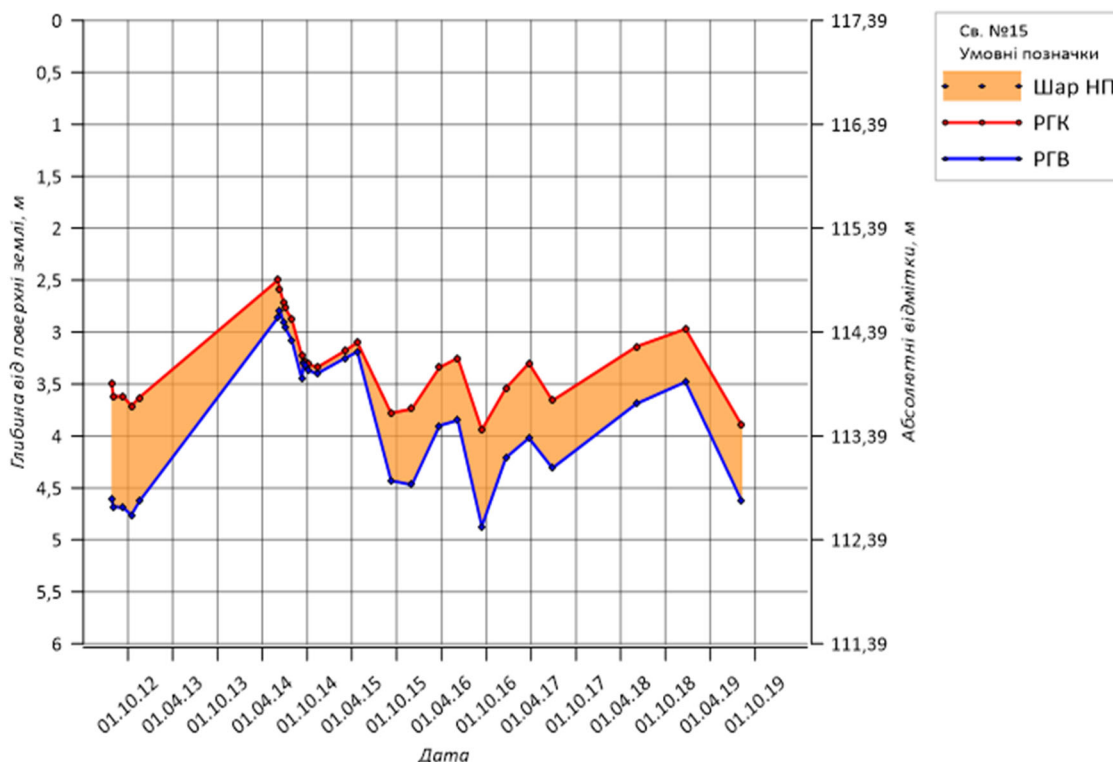


Рис. 3. Зміна товщини шару нафтопродукту при зміні рівня ґрунтових вод у свердловині № 15

Кількісна оцінка зони забруднення. Для кількісної оцінки зони забруднення необхідно оцінити формування капілярної зони "повітря–НП–вода" при піднятті РГВ та НП, а також потужність капілярної зони "НП–вода" та безпосередньо об'єм мобільної частини лінзи НП (Огняник та ін., 2013).

Розрахунок вмісту гасу за вертикаллю в межах виділених зон розраховано з використанням формули Van Genuchten (Van Genuchten, 1980):

$$\bar{\theta} = [1 + (\alpha h_c)^n]^{-m}, \quad (6)$$

де $\alpha = \{\alpha_{aw}, \alpha_{ao}, \alpha_{ow}\}$, $h_c = \{h_{aw}, h_{ao}, h_{ow}\}$.

У насиченій зоні вміст води (θ_w) розраховується за h_{ow} та α_{ow} . $\alpha_{ow} = \alpha_{aw} \sigma_{aw} / \sigma_{ow}$, $\alpha_{ow} = 23,81$ 1/м. h_{ow} у точці z розраховується за формулою

$$h_{ow} = (1 - \rho_{r.o})(z - H_{ow}^w) \quad (7)$$

Розрахунок проводився по св. 4 м, $H_{ow}^w = 112,89$, $H_{ao} = 113,73$.

За отриманим $\bar{\theta}_w$ визначається вміст води за формулою

$$\theta_w = \bar{\theta}_w(\theta_s - \theta_{w,r}) + \theta_{w,r} \quad (8)$$

Вміст НП оцінюється як

$$\theta_o = \theta_s - \theta_w. \quad (9)$$

Об'єм гасу в капілярній зоні:

$$V_o = \theta_{o,cp} h_{ow}^k; V_w = \theta_{w,cp} h_{ow}^k \quad (10)$$

Об'єм гасу в зоні з мобільним гасом:

$$V_o = \theta_{o,cp}(T^w - 0,36);$$

$$V_{ow} = (\theta_{w,cp} - \theta_{r,w})(T^w - 0,36);$$

$$\theta_{w,cp} = 0,220 \quad (11)$$

Об'єм гасу за площею:

$$V_{o,F} = V_o F; V_{w,F} = V_w F \quad (12)$$

Результати розрахунків розподілу та об'єму води та гасу в насиченій зоні наведено в табл. 1.

З табл. 1 видно, що в межах насиченої капілярної зони "НП–вода" перебуває 163 м³ гасу. У зоні з мобільними НП – 146 м³ гасу. Всього в насиченій зоні перебуває 310 м³ гасу.

За залежністю Van Genuchten було розраховано вміст рідини θ_l (вода + гас) за α_{ao} та h_{ao} , та вміст води за α_{ow} та h_{ow} . Розраховано аналогічно вищевказаному. $\alpha_{ao} = 12,61$ 1/м, знаходиться зі співвідношення $\alpha_{aw} \sigma_{aw} = \alpha_{ao} \sigma_{ao}$, $h_{ao} = \rho_{r.o}(z - H_{ao}^w)$, $\theta_o = \theta_l - \theta_w$.

Результати розрахунків вмісту НП у ненасиченій зоні наведено в табл. 2.

За результатами розрахунків у межах лінзи перебуває 404 м³ гасу, у т. ч. в ненасиченій зоні – 95,09 м³ або 23,5 % від загального об'єму гасу в лінзі. У насиченій зоні з мобільним гасом – 146 м³ або 36,1 % від загального

об'єму газу в лінзі. У насиченій капілярній зоні – 163 м³ або 40,3 % від загального об'єму газу в лінзі.

Виходячи з даних спостережень за рівнями води та НП та отриманих даних щодо об'єму газу в лінзі, можна зробити висновок, що ліквідаційні відкачки, які проводились до 2018 р., мали позитивний результат у стабілізації поширення забруднення та скороченні площі лінзи майже на 35 %. Площа лінзи за період з 2016–2019 рр. зменшилась з 7,89 га до 5,06 га (рис. 4). Максимальна товщина шару НП спостерігається у свердловинах 4 м

та 15 м та становить 0,84 та 0,74 м відповідно. Площа лінзи з такою товщиною шару НП становить близько 445 м². В інших свердловинах потужність НП коливається від 0,47 м до 0,08 м, отже мобільні НП в ґрунті практично відсутні.

Якщо враховувати, що помітне скорочення лінзи відбувалось у період 2017–2019 рр. за відсутності відкачок, можна стверджувати, що метод ліквідаційних відкачок за цих умов є неефективним, а для ремедіації забрудненої ділянки потрібно використовувати інші методи.

Таблиця 1

Результати розрахунку розподілу вмісту та об'єму НП та води в насиченій зоні

Розрахункова точка z, м		h_{ow} у точці z	θ , доля од.	θ_w , доля од.	θ_o , доля од.
Капілярна зона h_{ow}^k					
H_{ow}^k	113,08	0,038	0,896	0,382	0,019
H_{ow}	113,25	0,072	0,830	0,370	0,031
Зона з мобільним газом					
$T^w = 0,4$	113,29	0,08	0,818	0,368	0,033
$T^w = 0,5$	113,39	0,1	0,791	0,363	0,038
$T^w = 0,6$	113,49	0,12	0,768	0,359	0,042
$T^w = 0,7$	113,59	0,14	0,749	0,356	0,045
$T^w = 0,84$	113,73	0,168	0,725	0,351	0,050
Середнє значення, доля од.		Площа, F	Об'єм газу, V_o , м ³ , у межах		Об'єм рухомої води V_w , м ³ у межах
		T^w	м ²	1 м ²	площа
Капілярна зона					
0,376	0,025	0–0,8	50673	0,003	163
Насичена зона					
0,369	0,032	0–0,4	39977	0,001	53
0,366	0,035	0,4–0,5	5872	0,005	31
0,361	0,040	0,5–0,6	2924	0,010	29
0,357	0,044	0,6–0,7	1455	0,015	23
0,353	0,048	0,7–0,84	445	0,024	11
Всього:				310	3025

Таблиця 2

Результати розрахунку розподілення вмісту та об'єму НП в ненасиченій зоні

Результати розрахунку розподілення вмісту та об'єму пилу в попісній зоні									
T^w , м	Розрахункова точка z	h_{ao} , м	h_{ow} , м	θ_l , долі од.	θ_w , долі од.	θ_o , долі од.	$\theta_{o,cr}$ долі од.	Площа F, м²	Об'єм газу в межах площі, V_o , м³
h_{ao}^k , м									
0-0,4		0	0,08	0,401	0,368	0,033	0,031	39977	61,96
0,05		0,04	0,09	0,394	0,366	0,028			
0,4-0,6		0	0,12	0,401	0,359	0,042	0,034	8796	23,93
0,08		0,064	0,136	0,390	0,365	0,025			
0,6-0,8		0	0,168	0,401	0,351	0,050	0,044	1900	9,2
0,11		0,088	0,182	0,386	0,349	0,037			
Всього									95,09

Висновки. Забруднення геологічного середовища НП у районі складу ПММ аеропорту "Бориспіль" (Київська обл.) у вигляді лінзи авіаційного газу існує з 1998 р. Відновлювальні роботи з вилучення мобільних НП та забруднених ґрунтових вод, що проводились на ділянці досліджень, не дозволили повністю ліквідувати забруднення. Виникла потреба визначення ефективності ліквідаційних відкачок на забрудненій ділянці та доцільності їх подальшого застосування.

За час проведення ліквідаційних робіт на осередку забруднення (2001–2019 рр.) було вилучено та очищено 35 267 м³ забрудненої води та 353,81 м³ мобільних НП. Максимальний ефект спостерігався у 2001–2003 рр., протягом яких було вилучено 281,96 м³ НП – 79,7 % від загальної кількості вилучених НП. У період 2003–2019 рр. було вилучено 71,84 м³ НП – 20,3 % від загальної кількості. У 2019 р. ліквідаційні відкачки було призупинено, однак залишається загроза забруднення через втрати НП з трубопроводів.

Для визначення ефективності ліквідаційних робіт шляхом відкачок мобільних НП та ґрунтових вод було оцінено об'єм і стан знаходження НП у ґрунті та їх трансформацію в процесі коливання РГВ. Встановлено, що за відсутності впливу процесів коливання РГВ товщина шару НП у свердловині, за якої можна очікувати наявності шару мобільних НП у відкладах, становить $T^w \approx 0,36$ м, а отже за таких показників ліквідаційні відкачки є неефективними.

Колівання РГВ знижують ефективність ліквідаційних відкачок НП. Протягом 2011–2020 рр. можливість вилучення мобільних НП була лише в окремі періоди – за товщини шару НП понад 0,36 м. Шар мобільних НП в ґрунті спостерігався протягом 2012, 2014–2017 рр. та у 2019 р. У період з жовтня 2013 р. по жовтень 2014 р. та у 2018 р. НП переходив у защемлений стан у результаті підйому РГВ і майже не фіксувався спостережними свердловинами.

Для кількісної оцінки зони забруднення було оцінено формування капілярної зони "повітря–НП–вода" при піднятті РГВ та НП, потужність капілярної зони "НП–вода"

та об'єм мобільної частини лінзи НП. Встановлено, що в межах насиченої капілярної зони "НП-вода" перебуває 163 м³ гасу, в зоні з мобільними НП – 146 м³ гасу, та об'єм гасу в ненасиченій зоні становить 95,09 м³.

За даними спостережень за рівнями води та НП та отриманими даними щодо об'єму гасу в лінзі можна зробити висновок, що ліквідаційні відкачки, які проводились до 2018 р. мали позитивний результат щодо стабілізації поширення забруднення та скорочення площі лінзи майже на 35 % (у період 2016-2019 рр. площа лінзи

зменшилась з 7,89 га до 5,06 га). Враховуючи, що помітне скорочення лінзи відбувалось у період 2017–2019 рр. за відсутності відкачок, можна стверджувати, що метод ліквідаційних відкачок за цих умов є неефективним. Отже, для подальшої ремедіації забрудненої ділянки потрібно використовувати інші методи.

Отримані результати досліджень можуть бути застосовані для ліквідації забруднення геологічного середовища НП багатьох забруднених ділянок в Україні.

Projection: Gauss-Kruger Zone 6 (Pulkovo 1942)
used space of the snapshot resource <http://maps.yandex.ua/>

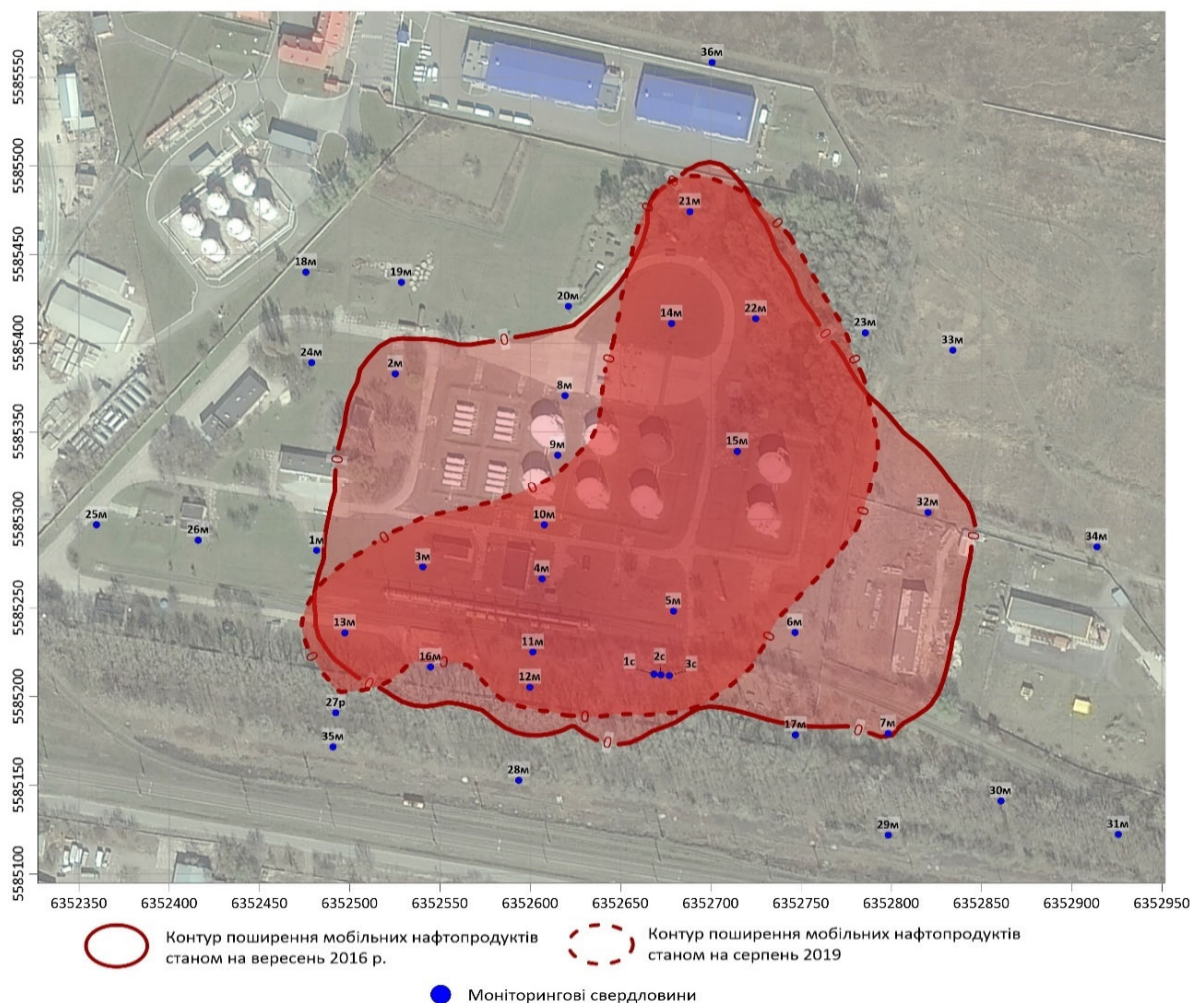


Рис. 4. Порівняння контурів поширення мобільних НП станом на вересень 2016 р. та серпень 2019 р.

Роботу виконано в рамках наукової теми "Наукові основи ліквідації забруднення геологічного середовища легкими нафтопродуктами" та частково профінансовано за бюджетною програмою "Підтримка розвитку пріоритетних напрямків наукових досліджень" (КПКВК 6541230).

Список використаних джерел

- Кржиж, Л., Резник, Д. (2007). Технології очистки геологической среды от загрязнения нефтепродуктами. *Экология производства*, 10, 54-57.
- Огняник, Н. С., Парамонова, Н. К., Брикс, А. Л., Гаврилюк, Р. Б. (2013). Эколого-гидрогеологический мониторинг территорий загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Монография. Київ: LAT&K.
- Огняник, Н.С., Шпак, Е.Н., Голуб, Г.И., Негода, Ю.А., Наседкина, О.И. (2002). Оценка эколого-геологического состояния территории авиабазы в связи с загрязнением грунтов и подземных вод нефтепродуктами. *Экология докiлля та безпека життєдiяльностi*, 5-6, 71–76.
- Шпак, О.М., Гаврилюк, Р.Б., Логвиненко, О.І. (2020). Дослідження забруднення геологічного середовища авіаційним гасом у районі

аеропорту "Бориспіль" з використанням математичного моделювання. *Мінеральні ресурси України*, 2, 49-53.

Abdul, A.S. (1992). A new pumping strategy for petroleum product recovery from contaminated hydrogeologic systems: Laboratory and field evaluations. *Ground Water Monit. Rev.*, 12(1), 105-114.

Charbeneau, R.J., Johns, R.T., Lake, L.W., McAdams, M.J. (2000). Free Product Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids. *Groundwater monitoring and remediation*, 20 (3), 147–158.

National Research Council. (1994). Alternatives for Ground Water Cleanup. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/2311>.

Newell, C.J., Acree, S.D., Ross, R.R., Huling, S.G. (1995). Light nonaqueous phase liquids. EPA Ground Water Issue. EPA 540-S-95-500.

Manual: Guidelines for Water Reuse. (1992). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/625/R-92/004 (NTIS 93-222180).

Shpak, E., Ognianik, N., Negoda, Y., Golub, G. (2003). Assessment of military airbase impact on the environment. *Proceedings of the 4th International Conference CERECO'2003, Miskolc, Hungary*, 366–369.

Testa, S.M., Paczkowski, M.T. (1989). Volume determination and recoverability of free hydrocarbon. *Ground Water Monit. Rev.*, 9(1), 120-128.

U.S.EPA (2005). Cost and performance report for LNAPL characterization and remediation. EPA 542-R-05-016, Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G).

Van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of un-saturated soils. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.*, 44(5), 892-898.

References

Abdul, A.S. (1992). A new pumping strategy for petroleum product recovery from contaminated hydrogeologic systems: Laboratory and field evaluations. *Ground Water Monit. Rev.*, 12(1), 105-114.

Charbeneau, R.J., Johns, R.T., Lake, L.W., McAdams, M.J. (2000). Free Product Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids. *Groundwater monitoring and remediation*, 20 (3), 147-158.

Krzehizh, L., Reznik, D. (2007). Technologies for cleaning the subsurface from petroleum contamination. *Production Ecology*, 10, 54-57.

Manual: Guidelines for Water Reuse. (1992). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/625/R-92/004 (NTIS 93-222180).

National Research Council. (1994). Alternatives for Ground Water Cleanup. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/2311>.

Newell, C.J., Acree, S.D., Ross, R.R., Huling, S.G. (1995). Light nonaqueous phase liquids. EPA Ground Water Issue. EPA 540-S-95-500.

Ognyanik, N.S., Paramonova, N.K., Briks, A.L., Gavriyuk, R.B. (2013). Ecological and hydrogeological monitoring of the areas of subsurface contamination with light petroleum products. Monograph. Kiev: Publishing house LAT & K.

Ognyanik, N.S., Shpak, E.N., Golub, G.I., Negoda, Yu.A., Nasedkina, O.I. (2002). Assessment of the ecological and geological state of the airbase territory in connection with soil and groundwater contamination with petroleum products. *Environmental ecology and life safety*, 5-6, 71-76.

Shpak, E., Ognyanik, N., Negoda, Y., Golub, G. (2003). Assessment of military airbase impact on the environment. *Proceedings of the 4th International Conference CERECO'2003, Miskolc, Hungary*, 366-369.

Shpak, O., Havryliuk, R., Lohvynenko, O. (2020). Research of subsurface contamination with gasoline within Boryspil airport using mathematical modelling. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 49-53. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2020.2.49-53>

Testa, S.M., Paczkowski, M.T. (1989). Volume determination and recoverability of free hydrocarbon. *Ground Water Monit. Rev.*, 9(1), 120-128.

U.S.EPA (2005). Cost and performance report for LNAPL characterization and remediation. EPA 542-R-05-016, Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G).

Van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of un-saturated soils. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.*, 44(5), 892-898.

Надійшла до редколегії 09.10.21

O. Shpak, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: shpak_lena@yahoo.com;
R. Havryliuk, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: gavriyuk.ruslan@gmail.com;
O. Lohvynenko, Junior Researcher,
E-mail: lohvynenko.olha@gmail.com;
Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine,
55-B O. Honchara Str, Kyiv, 01054, Ukraine

EFFICIENCY ASSESSMENT OF REMEDIATION ACTIONS IN THE SITE OF SUBSURFACE CONTAMINATION WITH PETROLEUM PRODUCTS WITHIN THE FUEL AND LUBRICANTS WAREHOUSE OF BORYSPIL AIRPORT

This paper is devoted to the topical problem of remediation of the subsurface contaminated with petroleum products. Subsurface contamination with petroleum products on the territory of the fuel and lubricants warehouse of Boryspil Airport in the form of the aviation kerosene lens has occurred for a long time. Remediation works on the removal of mobile petroleum products and contaminated groundwater, which were carried out at the research site, did not allow to completely eliminate contamination. To determine the efficiency of liquidation pumping of mobile petroleum products and groundwater, the volume and state of petroleum products in soil and their transformation under the influence of groundwater level fluctuations were assessed. Using the method we developed, the minimum value of the thickness of a petroleum product layer in a well, at which mobile petroleum products are absent in soil and liquidation pumping becomes inefficient, was calculated. According to the monitoring data and calculation of the kerosene volume in the lens, liquidation pumping on the contaminated area led to the stabilization of contamination spreading and reduction of the aviation kerosene lens area.

Keywords: remediation, geological environment, contamination, petroleum products, liquidation pumping

Е. Шпак, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: shpak_lena@yahoo.com;
Р. Гаврилюк, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: gavriyuk.ruslan@gmail.com;
О. Логвиненко, мл. науч. сотр.,
E-mail: lohvynenko.olha@gmail.com;
Институт геологических наук НАН Украины,
ул. О. Гончара, 55-Б, г. Киев, 01054, Украина

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМЕДИАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ТЕРРИТОРИИ СКЛАДА ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ АЭРОПОРТА "БОРИСПОЛЬ"

Посвящено актуальной проблеме ремедиации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами. Загрязнение геологической среды нефтепродуктами на территории склада горюче-смазочных материалов аэропорта "Борисполь" в виде линзы авиационного керосина существует длительное время. Восстановительные работы по извлечению мобильных нефтепродуктов и загрязненных грунтовых вод, которые проводились на участке исследований, не позволили полностью ликвидировать загрязнение. Для определения эффективности ликвидационных откачек мобильных нефтепродуктов и грунтовых вод оценены объем и состояние нефтепродуктов в грунте и их трансформация в процессе колебаний уровня грунтовых вод. По разработанной нами методике рассчитано минимальное значение мощности слоя нефтепродуктов в скважине, при котором мобильные нефтепродукты в грунте отсутствуют, и ликвидационные откачки становятся неэффективными. Согласно данным мониторинга и расчетов объема керосина в линзе, ликвидационные откачки на загрязненном участке привели к стабилизации распространения загрязнения и сокращению площади линзы авиационного керосина.

Ключевые слова: ремедиация, геологическая среда, загрязнение, нефтепродукты, ликвидационные откачки.

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 550.681.3 (477.5)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.12>**Д. Хрущов**, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,

Інститут геологічних наук НАН України,

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

С. Чумаченко, д-р техн. наук,

E-mail: sergiy23.chumachenko@gmail.com,

Національний університет харчових технологій,

вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01033, Україна;

В. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.,

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com;

П. Трофименко, д-р с.-г. наук, доц.,

E-mail: trofimenkopetr@ukr.net,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

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

E-mail: asplodytel@gmail.com

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

пр. Ак. Палладіна, 34, м. Київ, 03680, Україна

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ІНФОГЕОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
ТЕРИТОРІЙ ВІЙСЬКОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)*

Розроблено засади інфогеологічного моделювання територій військової діяльності (на прикладі одного з військових полігонів України) для інформаційного забезпечення досліджень та робіт щодо поводження з геологічною складовою досліджуваних територій. Основним методологічним інструментом досліджень є інформаційне моделювання. З огляду на переважно локальний рівень масштабності територій військової діяльності, головним методичним прийомом слугує комплексна еколого-геологічна модель. Методи, розроблені на принципах цієї парадигми, спрямовані на ліквідацію наслідків військової діяльності та відновлення територій збройних конфліктів. Наземні дослідження розроблено з використанням концептуальних моделей і, зокрема, перевіркою основних компонентів цих моделей, що націлені на ідентифікацію ними невизначеностей. Оцінка поширення факторів воєнно-техногенного навантаження хімічного походження у функціональних зонах та підзонах військового полігону здійснювалася на основі комплексного підходу до еколого-геохімічної оцінки забруднення територій інтенсивного воєнно-техногенного навантаження із застосуванням ландшафтного профілювання та імітаційного моделювання із врахуванням геохімічних і гідрометеорологічних умов. Проведений аналіз забруднення ґрунтів речовинами воєнно-техногенного походження в місцях розташування функціональних підзон мішених полів військового полігону засвідчив, що на них значення концентрацій деяких забруднюючих речовин перевищує встановлені норми у 5–20 разів. Польові дослідження на військовому полігоні демонструють зональний характер забруднення, що групується навколо локальних підзон військового об'єкта, які залучаються до проведення та забезпечення заходів бойової підготовки з використанням озброєння і військової техніки, а також є головним джерелом факторів військово-техногенного навантаження на геологічне середовище. Перспективи подальшого розвитку напряму полягають у розробленні цілісної теорії інфогеологічного моделювання геологічного середовища територій військової діяльності, орієнтованої на оцінку різних типів впливів та загроз.

Ключові слова: геологічне середовище, інфогеологічне моделювання, військовий полігон.

Актуальність, постановка проблеми. Військові дії протягом сучасного етапу новітньої історії ведуться майже безперервно. При цьому відбувається руйнування ландшафту, забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, що потребує їх подальшого відновлення.

Незважаючи на всі екологічні гасла, які проголошуються світовою спільнотою (ООН, ЮНЕСКО, трансрегіональними військово-політичними організаціями), роботи з екологічного відновлення територій, порушених у результаті військової діяльності (ВД), у цілому можна розцінювати як незадовільні.

Підставою для такої оцінки є визнання двох чинників: перший – такі роботи виконуються переважно в економічно розвинених і стабільних країнах або в окремих країнах за їх допомогою. В усіх інших випадках розв'язання цих проблем відтерміновується, зазвичай на доволі тривалий час. Другий чинник – вони застосовуються головним чином для великих військових баз або аеродромів з нафтовим і хімічним забрудненням підземної гідросфери.

Методико-методологічне забезпечення робіт засновано на вузько спрямованих традиційних предметних підходах очищення геологічного середовища (ГС), а приклади комплексного системного підходу носять поодинокий характер. Це зумовлює неповноту і недостатню ефективність деяких природоохоронних проєктів цього напрямку.

Причина такого стану полягає у відсутності цілісної теорії відновлення навколишнього природного середовища (НПС) територій, порушених у результаті військової діяльності. Насамперед, це стосується ГС, яке є важливою складовою довкілля. Наднормативна експлуатація природних ресурсів (передусім нафти, природного газу, вугілля, деревини) призводить до відчуження великих територій, нераціональної експлуатації ресурсів та істотного забруднення навколишніх територій, поверхневих і підземних вод. Наслідки бойових дій значно збільшують ризики виникнення аварійних ситуацій на промислових підприємствах та інфраструктурних об'єктах.

Вищенаведене зумовлює нагальну потребу постановки наукової тематики з розроблення теорії інформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з ГС територій військової діяльності.

Мета роботи – представлення концепції інформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з ГС територій військової діяльності (на прикладі територій України).

Основні завдання:

- аналітичний огляд вітчизняного та світового досвіду поводження з територіями військової діяльності;
- позначення методологічних основ інформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з ГС територій військової діяльності;

© **Хрущов Д.**, Чумаченко С., Зацерковний В., Трофименко П., Сплодитель А., 2022

- розробка методичних підходів інформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з ГС територій військової діяльності (принципів інфогеологічного моделювання);

- демонстрація прикладів інфогеологічного моделювання конкретних геологічних об'єктів (ГО);

- узагальнення отриманих результатів, позначення основних напрямів подальшого розвитку теорії інформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з ГС територій військової діяльності як самостійного прикладного напрямку геоінформатики та інфогеології.

Аналіз останніх досліджень. За наявності практично перманентних військових конфліктів на різних континентах Землі з відповідними негативними наслідками на НПС, системні наукові дослідження у сфері оцінки збитків довкілля (у т. ч. ГС) мають фрагментарний характер. На це є дві причини: екологічні (і еколого-геологічні) оцінки таких територій далеко не завжди проводились і не завжди оприлюднювались, а програмні заходи з екологічної реабілітації по суті виконувались в рідкісних випадках і з фінансуванням за залишковим принципом. Природно, за таких умов постановка проблеми загальної теорії інформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з ГС територій військової діяльності досі не привертала інтересу вчених близьких предметних напрямів. Більш-менш результативні програми відновлення територій військових баз і інших об'єктів ВД виконували кілька розвинених країн, наприклад, у США певна кількість ділянок військових об'єктів (аеродроми, бази сухопутних військ, ракетні бази, полігони) віднесені до списку так званого суперфонду – програми відновлення територій, що почала діяти на початку 90-х років ХХ ст. За програмою НАТО і деяких національних програм проводились аналогічні роботи у країнах Європи – Німеччині, Португалії, Швеції, Чехії, Словаччині, а також державах Прибалтики (*Хрущов та ін., 2017*), де наведені дані щодо використовуваних технологій, а також можливих інформаційних моделей ділянок забруднень ГС.

На сучасному етапі розвитку суспільства існує ряд технологій, які мають вирішальне значення для формування сучасних еколого-геохімічних досліджень. Насамперед, це матеріали дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), глобальні системи позиціонування (GPS, Galileo та ін.), що забезпечують високу точність та навігацію, застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), дронів тощо.

МДЗ разом з технологіями геоінформаційних систем сприяли широкому розвитку методів просторового аналізу ГС, оцінки широкомасштабних просторових закономірностей, виявлення тенденцій змін у просторі і в часі тощо. Технології ДЗЗ дали можливість пасивного або активного збору даних для пошуку та ідентифікації військових об'єктів, їх класифікації, здійснення просторового аналізу забруднювачів, виявлення і кількісного обчислення змін ГС, територій локальних військових конфліктів, полігонів тощо.

Виклад основного матеріалу. Факт небезпечного впливу ВД на довкілля визнається в низці наукових і громадсько-політичних публікацій, у звітах і протокольних матеріалах різних міжнародних політичних і громадських організацій (програма ООН з довкілля (ЮНЕП), НАТО), а також військових служб з відповідними прерогативами. Прикладом може слугувати вторгнення коаліційних військ в Ірак в 2003 р., коли ряд промислових об'єктів зазнали пошкоджень у результаті ВД або через воєнні дії були кинуті напризволяще, що спровокувало мародерські дії місцевого населення з розкиданням небезпечних, у т. ч. високотоксичних речовин, на поверхні, результатом чого стало забруднення ґрунтів і підземних вод.

У науковій літературі останніх десятиріч з'являються фрагментарні дані щодо порушень довкілля (і ГС зокрема) у результаті ВД на різних континентах (Європа – країни колишньої Югославії; Азійсько-Тихоокеанський регіон – В'єтнам, Камбоджа, Афганістан, Індія–Пакистан; Близький Схід – Ізраїль–Палестина, Сирія; Африка – Марокко, Лівія, Ангола; Фолклендські острови). У деяких працях наводяться схематичні геологічні моделі забруднених ділянок. Подібні методики аналізу забруднення використовувались під час конфлікту в Косово внаслідок обстрілу цивільної інфраструктури, а саме виробничих підприємств, що призвело до значного викиду промислових забруднень у НПС.

В Україні, в південно-східній її частині, фактично відбуваються повномасштабні бойові дії з відповідними порушеннями ГС. Ці порушення охоплюють дві групи: прямі і непрямі. Прямі – це механічні деформації земної поверхні та хімічні забруднення ГС. Непрямі – ті, що спричинені наслідками невиконання традиційних заходів охорони ГС – затоплення шахт, підтоплення територій і забруднення підземних вод через реалії економічного стану держави.

Внаслідок фрагментарності системи екологічного моніторингу ГС, проведення АТО та недостатнього фінансування, зростає загроза забруднюючого впливу витоків токсичних фільтратів з полігонів промислових і побутових відходів, ділянок розташування териконів, фільтрувальних накопичувачів стічних вод. Тому з урахуванням рекомендацій місцевих підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Міністерства охорони здоров'я та обласних військово-цивільних адміністрацій були визначені 35 пунктів обстеження джерел питного водопостачання у складних еколого-техногенних умовах з одночасним відбором проб ґрунтів (на прикаптажній території) та вимірюванням радіаційного фону (Донецька область – 23 проб, Луганська область – 12 проб) на підконтрольній території та 26 пунктів обстеження джерел питного водопостачання з одночасним відбором проб ґрунтів (на прикаптажній території) на непідконтрольній українській владі території (Донецька область – 26 проб). Враховуючи вищезазначені умови, що склалися в цьому регіоні, було розроблено індикативну схему проведення експрес-досліджень, яка дає змогу оцінити найбільш критичну (вразливу) ланку для забезпечення екологічної безпеки та безпеки життєдіяльності в цьому регіоні.

Методологія теорії інформаційного забезпечення досліджень та робіт щодо поводження з геологічною складовою територій ВД базується на оцінці всієї системи порушеного ГС (як певного геологічного об'єкта, або інфогеофрейма), що становить основу для визначення програмних заходів з відновлення.

Інфогеологічне визначення системи геологічного об'єкту ВД передбачає певний кінцевий об'єм ГС (або інфогеофрейм), що підданий дії факторів ВД.

Інакше кажучи, геологічний об'єкт території ВД – це антропогенно (техногенно)-геологічна система, що охоплює первинну структурно-речовинну матрицю та явища і процеси порушень ГС як результат дії (впливу) ВД.

Предмет досліджень – механічні та фізико-хімічні характеристики порушень, пов'язаних із ландшафтно-формаційними та структурно-літологічними параметрами ГС об'єкта.

Інфогеологічне визначення передбачає визначення первинної структурно-речовинної матриці ГС (породний масив – твердофазна матрична основа і підземні води – флюїдна динамічна складова), початкові фактори впливу ВД (механічні деформації і фізико-хімічні

порушення ГС), явища і процеси порушення ГС, просторово-часові виміри (первинні: деформації ґрунтового шару і структури породного масиву; порушення динаміки підземних вод; впровадження забруднюючих і чужорідних речовин; захаращення поверхні та вторинні – розвиток небезпечних геологічних явищ і процесів; деформації рельєфу; фізико-хімічні забруднення ґрунтів і порід небезпечними та сторонніми речовинами; забруднення підземних вод з динамічним поширенням в ГС; процеси самовідновлення ГС).

Ці фактори є загальними для всіх видів ВД і становлять зміст інфогеологічного моделювання. Узагальненими характеристиками типових порушень ГС по видах ВД виступає:

- діяльності військових об'єктів (порушення рельєфу поверхні, ґрунтів поверхневими технічними спорудами (будинки, ангари, трубопроводи тощо));

- порушення верхніх горизонтів ГС приповерхневими і підземними спорудами (бункери, сховища ПММ, бойових матеріалів тощо);

- забруднення ГС (порід, підземних вод) паливно-мастильними матеріалами (ПММ), сольвентами, відходами гальваніки, дезактиваційними розчинами, залишками ракетного палива;

- захаращення поверхні (іноді – підземних порожнин) твердими залишками і відходами різного складу.

Для різних типів військових об'єктів комплекси порушень можуть різнитись від виду і типів бойових дій і військових полігонів, порушень рельєфу поверхні, ґрунтів (локально – верхніх горизонтів ГС – воронки вибухів, наслідки руху бойової техніки), захисних споруд – окопів, бліндажів, вогневих точок, протитанкових споруд тощо, забруднення верхніх горизонтів ГС (порід, підземних вод) продуктами БД (або діяльності полігону відповідно з його спеціалізацією), захаращенням поверхні залишками бойової техніки, захисних споруд, осколками, на полігонах різного роду мішенями тощо.

Хімічна і геохімічна ідентифікація типів забруднення. До хімічного (фізико-хімічного) забруднення, первинними функціональними ознаками, належать: пальне для транспортних засобів та для побутового опалення, мастильні матеріали, сольвенти, відходи гальванічного виробництва, залишки хімічної зброї, дезактиваційні речовини. Небезпечними речовинами фізико-хімічного типу є вибухонебезпечні і пальні матеріали.

За хімічним складом основні типи забруднень належать до кількох груп речовин. Пальне для транспортних засобів і ПММ являють собою вуглеводні. В деяких випадках вони містять присадки-мікрокомпоненти, які зазвичай є токсичними. Забруднення вуглеводного походження може бути представлене як нафтопродуктами, так і складовими нафти і нафтопродуктів – парафінами, нафтенами, ароматичними вуглеводнями, їх похідними – бензолом, толуолом, а також поліциклічними вуглеводнями (нафталіном, периленом та ін.). Окрему групу становлять хлорвуглеводневі сполуки: діхлоретан, трихлоретан, хлорбензол тощо. Вони так само, як і толуон та інші гомологи бензолу, являють собою більшу частину сольвентів. Забруднення трихлоретаном пов'язане також із залишками ракетного пального.

Хімічні мікрокомпоненти забруднення представлені важкими металами: кадмієм, миш'яком, свинцем, цинком, міддю, ртуттю, талієм та ін.

Форми поширення і поведінка забруднювачів у геологічному середовищі. Розглянутим різноманітним хімічним сполукам, що виступають основними типами

забруднювачів, властиві різні форми надходження і закономірності поведінки в ГС.

Для рідких вуглеводневих речовин (нафта, нафтопродукти, хлорні вуглеводневі сполуки) характерні вільна та емульсійна неполярнізовані форми, що легко піддаються вилученню. Нафтопродукти, як і нафта, головним чином є гідрофобними речовинами. Але контактуючі води можуть бути насичені похідними вуглеводнів у газовій фазі, а також бензолом, фенолом, органічними кислотами. Якщо в ореолі забруднення присутні органічні розчинники, нафтопродукти можуть переходити в розчин. Незначна частина дисоційованих форм органічних сполук може сорбуватися.

Неорганічні забруднюючі речовини (важкі метали, солі та інші хімічні сполуки) утворюють тверді фази, розчини (істинні і колоїдні), суспензії та сорбовані фази. Фазові переходи перебувають у рухливій рівновазі, процеси осадження-розчинення, сорбції-десорбції залежать від термодинамічних умов середовища.

Загальна схема розподілу забруднення контролюється двома головними факторами протилежної спрямованості: міграцією і затримкою. Провідний фактор переносу забруднення будь-якого типу в геологічному середовищі – рух підземних вод.

Затримка відбувається в бар'єрах геологічного середовища. Основні функціональні типи бар'єрів – механічні (фільтраційні), фізико-механічні і біологічні.

Найбільш міграційно здатні в геологічному середовищі (власне водному) іонні форми, а також комплекси (хлоридні, сульфатні, металоорганічні). Сорбовані фази певну рухливість можуть отримувати в суспензіях із сорбентами.

Методичним апаратом структурування об'єктів для моделювання слугує принцип фреймової організації ГС.

Загальна процедура інфогеологічного моделювання (ІГМ) досліджуваного ГО охоплює два блоки, які пов'язані певними залежностями і послідовно-етапними зв'язками: 1 – комплектація інформації; 2 – розроблення ІГМ.

Блок комплектації інформації включає дві групи операцій: компіляція бази даних і використання наявної та (або) встановлення спеціалізованої системи моніторингу.

База даних містить масив вихідних даних щодо структури і літологічних характеристик, фізико-механічних (у т. ч. гідравлічних) властивостей структурних елементів породного масиву, гідрогеологічних (гідродинамічних та гідрохімічних) параметрів підземних вод і, нарешті, характеристик забруднення, що систематизуються згідно із загальноприйнятими нормативно-методичними правилами.

Система моніторингу базується на відстежуванні процесів зміни основних елементів ГС (ґрунтів, порід, підземної гідросфери, геоморфодинаміки – рельєфу поверхні тощо) у часі і просторі з особливою увагою щодо небезпечних геологічних явищ.

Блок розроблення ІГМ. Процедура моделювання передбачає ідентифікацію об'єкта (визначення функціонального типу і первинну загальну характеристику), визначення просторового об'єму, тобто зовнішньої структури ГО (ІГФ), встановлення внутрішньої структури об'єкта (формаційної (літофациальної) структуризації), структуризації підземних вод, ідентифікації і структуризації порушень і забруднень ГС, комп'ютерної побудови моделі, її верифікації. Завершальним етапом має бути експертна інтерпретація отриманої (віртуальної) моделі по комплекту замовлених користувачем похідних.

На підставі МДЗ, георадарної зйомки, моніторингу тощо розробляється підсумкова складна модель, яка відповідає визначенню комплексної еколого-геологічної моделі (Хрущов та ін., 2017) і відображає як статичні

характеристики об'єкта, так і процеси його змін з відповідною прогноною функцією.

Для верифікації моделей і оптимізації адекватності оцінок впливу небезпечних геологічних явищ можуть використовуватись принципи імітаційного моделювання з використанням методик агрегованих індексів (матриці Петерсена), адаптивних оцінок Холлінга, а також більш конкретизованої методики матриць Леопольда, східчастої діаграми Соренсена, мережевої діаграми, метод сполученого аналізу карт і, нарешті, факторний аналіз (Вентцель, 1962; Гришин, 2001; Эйкхоф, 1975; Клемин и др., 2000; Свешков, 1965; Хуторский, 1999).

Експертна інтерпретація отриманої моделі власне і становить основу для формулювання системи заходів і технічних рішень щодо поводження з

об'єктом досліджень (у форматі певних документів – звітів, рекомендацій, технічних пропозицій тощо за вимогами замовника).

Об'єкт досліджень (ГС ТВД) доцільно розглядати як визначальну складову географічного поняття "геосистема", а саме природно-техногенну геосистему – територію військової діяльності (геосистема ТВД).

Геосистема ТВД – це комплексна природно-техногенна система об'єкта ВД, що охоплює біосферу з її складовими: атмосферою, гідросферою і ГС (точніше інфогеофреймом відповідної частини літосфери). Зовнішня структура (інфогеофрейм) обмежується зоною впливу техногенних порушень.

Загальна структура геосистеми ТВД і взаємозв'язки підпорядкованих сфер представлено на рис. 1 та 2.

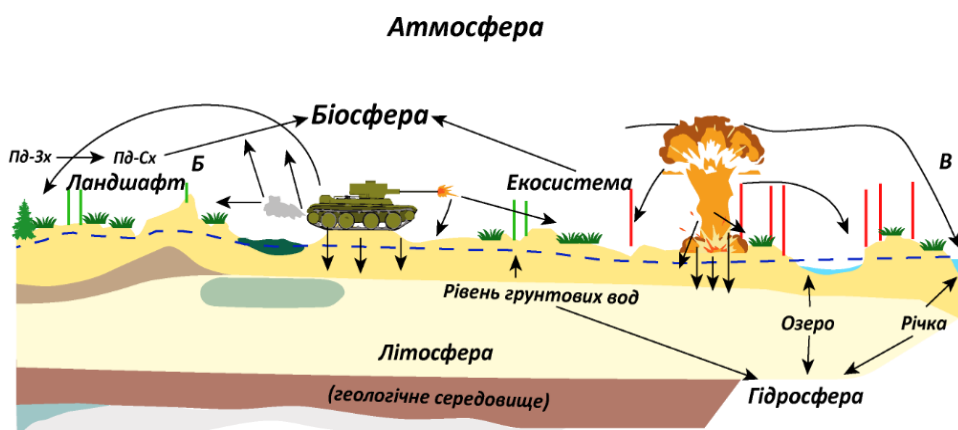


Рис. 1. Узагальнена принципова екологічна схема взаємодії між елементами військової природно-техногенної геосистеми під час бойової підготовки

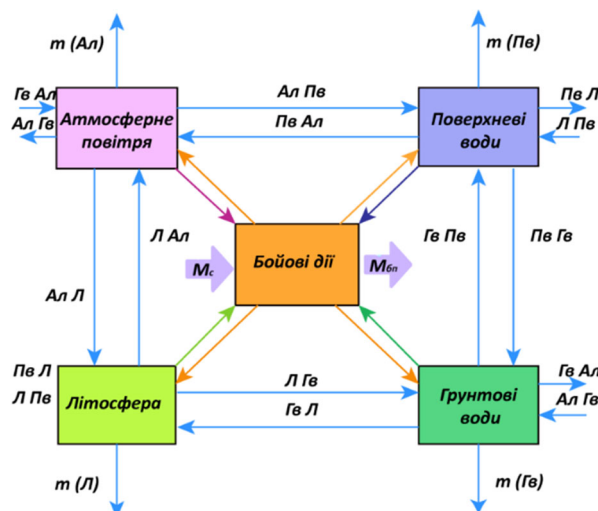


Рис. 2. Схема розподілу потоків підземних вод і забруднюючих речовин у геосистемі військового полігону:
(АлЛ – Атмосфера – Літосфера; АлПв – Атмосфера – Поверхневі води; ПвЛ – Поверхневі води – Літосфера;
ПвАл – Поверхневі води – Атмосфера; ПвГв – Поверхневі води – Ґрунтові води; ГвЛ – Ґрунтові води – Літосфера;
ГвПв – Ґрунтові води – Поверхневі води; ГвАл – Ґрунтові води – Атмосфера)

Наведена схема має ряд обмежень. Так, блок "літосфера" містить зону впливу ВД, що простежується всередину до зони насичення верхнього водоносного горизонту.

Блок "напірні підземні води" штучно умовно виключений із загальної схеми, розглядається тільки горизонт ґрунтових безнапірних вод, що є головним його індикатором. Кожний із блоків-елементів природного середовища у ВПТГС має деяку внутрішню рівновагу, тобто перебуває у квазістаціонарному стані. Однак на межі гомогенності середовищ спостерігаються взаємообмінні

потоки масопередачі, що можуть бути активізовані за рахунок факторів ВД.

Потоки, пов'язані з блоком "Бойові дії", позначені цифровими індексами. Визначення цих потоків наведено в табл. 1.

Прогнозування величини потоків техногенного навантаження у військовій природно-техногенній геосистемі, ряд специфічних розрахунків, пов'язаних із блоками-компонентами природного середовища, найбільш доцільно виконувати балансовими методами, враховуючи їх значну просторово-часову мінливість.

Таблиця 1

Класифікація потоків масопередачі між блоками військової природно-техногенної геосистеми

Блоки	Бойова підготовка	Атмосфера	Літосфера	Поверхневі води	Ґрунтові води	Основні процеси масопередачі
Бойова підготовка (1)	-	1.2	-	-	-	Молекулярна і конвективна дифузія, фільтрація, сорбція
	-	-	1.3	-	-	
	-	-	-	1.4	-	
	-	-	-	-	1.5	
Атмосфера (2)	2.1	-	-	-	-	На потреби БП
	-	-	АпЛ	-	-	Осадження, сорбція
	-	-	-	АпПв	-	Те ж саме
	-	-	-	-	-	Інфільтрація
Літосфера (3)	3.1	-	-	-	-	На потреби БП
	-	ЛАп	-	-	-	Вивітрювання
	-	-	-	ЛПв	-	Вимивання, вилукування
	-	-	-	-	ЛГв	Те ж саме
Поверхневі води (4)	1.4	-	-	-	-	На потреби БП
	-	ПвАп	-	-	-	Випаровування, десорбція
	-	-	ПвЛ	-	-	Сорбція, осадження
	-	-	-	-	ПвГв	Фільтрація
Ґрунтові води (5)	5.1	-	-	-	-	На потреби БП
	-	ГвАп	-	-	-	Випаровування, десорбція
	-	-	ГвЛ	-	-	Сорбція, осадження
	-	-	-	ГвПв	-	Розвантаження в базиси ерозії

Як уже зазначалось, поведінка забруднюючих речовин в ГС як складової частини геосистеми ВП, визначається речовинними, фізико-механічними (передусім ємнісно-фільтраційними), геохімічними, гідрогеологічними (гідродинамічними та гідрохімічними) і врешті-решт термодинамічними властивостями його структурно-речовинної матриці. У зв'язку з визначальною роллю геохімічних методів при моделюванні об'єктів ВД доцільне використання підходів ландшафтно-геохімії.

Як приклад розглянемо інфогеологічне моделювання еколого-геохімічних характеристик територій військового полігону "Дівички". Ландшафтна карта дозволяє встановити і картографічно відтворити геохімічні умови території полігону. Для геохімічних показників: кислотність ґрунтів (рН), вміст гумусу та глибина залягання глейового горизонту, для типових ґрунтових відмін першої тераси Дніпра було розроблено комплекс карт (Davydchuk et al., 2004). У табличній формі згадані показники наведено в табл. 2. Територіальний розподіл значень водного рН, що відображає кислотність ґрунтових розчинів у різних типах ґрунтів для ВП "Дівички", наведено на рис. 3.

З рис. 3. видно, що серед ґрунтів полігону максимальна кислотність (рН<4,5) властива для сухих ґрунтових відмін відносно підвищених ділянок першої тераси Дніпра. А кислотність органогенних ґрунтів у замкнених пониженнях дещо менша рН ≈ (6,0-6,5), що може сприяти акумуляції забруднювачів у подібних місцезонах.

Глибина горизонту максимального оглеєння у ґрунті є важливим показником щодо міграції елементів із змінною валентністю. До таких належать, зокрема, залізо,

алюміній, плутоній та ін. Для таких елементів глейовий горизонт відіграє роль бар'єра на шляху їхньої міграції. Для території полігону "Дівички" глибина залягання глейового горизонту у ґрунтах варіює від 0,0–0,3 м для торфово-болотних та дернових глейових ґрунтів до 2,0–2,5 і більше метрів для сухих дерново-підзолистих ґрунтів.

Завдяки цьому, залежно від форм рельєфу, літології поверхневих відкладів та характеру рослинного покриву, утворюються зони переважального винесення або транзиту, або ж акумуляції речовин та елементів, які були залучені до міграції.

Застосування систем зброї і військової техніки на навчальних об'єктах військових полігонів Сухопутних військ в умовах наближених до реальних характеризується специфікою багатофакторного та циклічного воєнно-техногенного навантаження бойової підготовки на докільля (Романченко та ін., 2006; Клемин та ін., 2000; Лисенко та ін., 2004).

На навчальних об'єктах військового полігону, де проводяться стрільби із широкого спектра систем тактичної зброї, спостерігається забруднення ґрунтів та ґрунтових вод як головного "депо" повітряних і наземних викидів важких металів, залишків вибухових речовин і порохів (Чумаченко, 2003).

Принципово важливим є те, що система "ґрунти – зона ненасиченої фільтрації – ґрунтовий водоносний горизонт", яка депонує значну частину воєнно-техногенних забруднень, з часом впливає на екологічний стан біосфери, поверхневої гідросфери та приземної атмосфери.

Таблиця 2

Значення деяких геохімічних показників для типових ґрунтових відмін ВП "Дівички"

Ґрунтові відміни	рН	Вміст гумусу або органіки	Глибина глейового горизонту, м
1. Дернові слабо розвинені піщані на незакріплених алювіальних або еолових пісках	>4,5	< 0,2 %	1,5–2,5
2. Дерново-підзолисті піщані на алювіальних пісках	>4,5	0,2–1,0 %	1,5–2,5
3. Дерново-підзолисті піщаво-піщані на алювіальних піщавих пісках	4,5–5,0	1,0–2,0 %	1,5–2,5
4. Заплавні дернові глейові піщані на алювіальних пісках	5,0 - 5,5	1,0–2,0 %	0,7–1,5
5. Дерново-підзолисті глейові піщані на алювіальних пісках та дернові глейові піщаво-піщані на делювіальних піщавих пісках	5,5–6,0	2,0–5,0 %	0,3–0,7
6. Торфово-болотні на низинних торфах	<6,0	Орг. 80 %	0–0,3

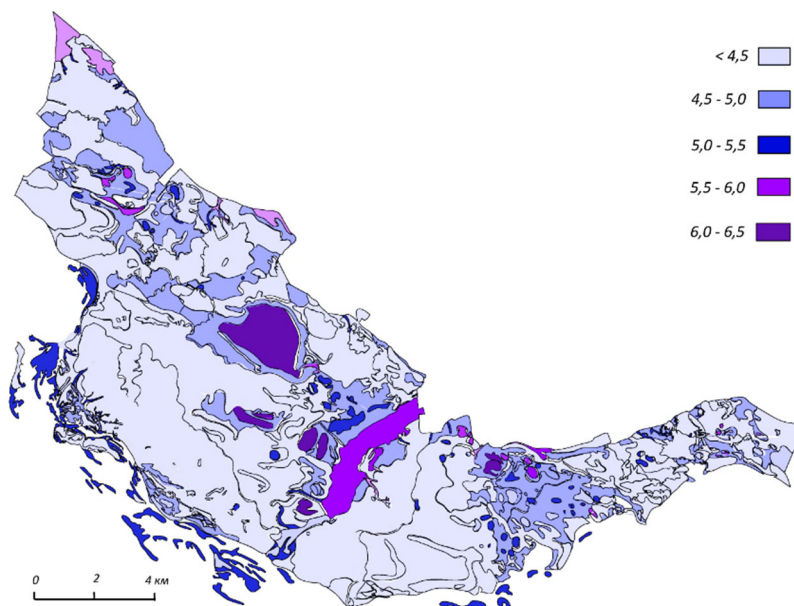


Рис. 3. Кислотність верхнього ґрунтового горизонту (рН водний)

При визначенні екологічного стану ґрунтів користуються в основному якісно-оціночними ландшафтно-геохімічними методами, які спрямовані на встановлення фактичного забруднення і дають можливість провести ретроспективний аналіз наслідків воєнно-техногенного навантаження (Гришин, 2001; Романченко та ін., 2006; Петрашин и Лысяный, 1986; Хуторский, 1999). Але для прогнозування поширення хімічного забруднення від тих чи інших воєнно-техногенних джерел навчальних об'єктів, враховуючи їх високу локальність, енергетичну потужність і хімічну градієнтність, та визначення профілактичних заходів і заходів з рекультиватії забруднених територій, ці методи є непридатними (Лисенко та ін., 2004; Шеннон, 1978). При вирішенні завдань воєнної екології тільки прецизійні методи можуть дати необхідні за точністю розрахунки забруднення ґрунтів і ґрунтових вод та прогнозувати його розвиток у локальних функціональних підзонах у межах навчальних об'єктів та функціональних зонах ВП (Горев та ін., 1999; Лисенко та ін., 2004). Основу для таких методів можуть скласти математичні моделі, які з високим ступенем точності описують процеси утворення техногенних полів розподілу

забруднення (атмогеохімічних, ландшафтно-геохімічних, гідрогеохімічних) внаслідок постійного чи періодичного впливу заходів бойової підготовки на відповідну територію, визначають концентрацію, швидкість і напрямки його розповсюдження.

Зміни гідрогеохімічних умов горизонту ґрунтових вод через значну уповільненість їхнього руху (10–100 м/рік) і сорбційну здатність порід доцільно розглядати окремо на базі гідрогеоміграційних моделей. Метою оцінки поширення факторів воєнно-техногенного навантаження хімічного походження у функціональних зонах та підзонах ВП є застосування комплексного підходу до екологічної оцінки забруднення територій інтенсивного ВТН із застосуванням ландшафтного профілювання та імітаційного моделювання із врахуванням геохімічних і гідрометеорологічних умов, беручи до уваги те, що атмогеохімічна система військового полігону "приземна атмосфера – ґрунт" є головною у перерозподілі ВТН хімічного походження і формуванні екологічних умов у функціональних зонах і підзонах ВП.

У загальному вигляді процедуру комплексної оцінки поширення факторів ВТН наведено на рис. 4.

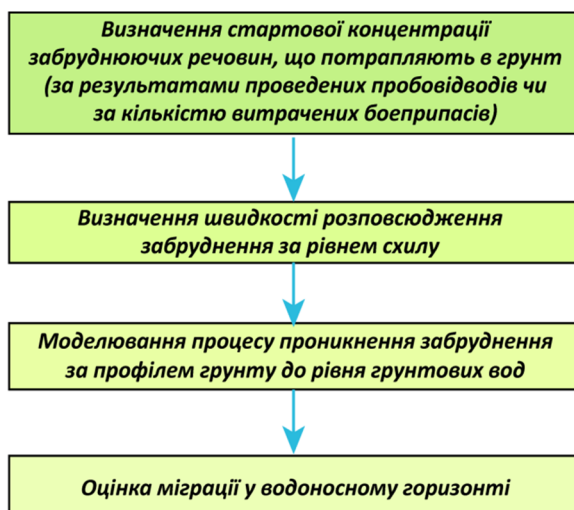


Рис. 4. Процедура комплексної оцінки поширення факторів ВТН

Більшість речовин, які утворюються внаслідок застосування систем зброї і військової техніки, являють собою тверді, розчинні чи дрібнодисперсні речовини, які або відразу потрапляють на поверхню землі, або осідають на неї з атмосфери. Отже, основним об'єктом забруднення для НО ВП виступає верхня зона літосфери у складі ґрунту та підстильних порід.

Завдяки дифузійно-дисперсійним та конвективним процесам (фільтрації, інфільтрації), а також процесам розчинення, сорбції-десорбції поверхневі забруднення ґрунтів переносяться з верхніх шарів у підстильні породи зони ненасиченої фільтрації та ґрунтові води, де можуть або накопичуватись у вигляді геохімічних аномалій за наявності геохімічних бар'єрів, або мігрувати на значні відстані з ґрунтовими водами.

Тому, хоч забруднення ґрунтів НО від заходів БП носить локальний характер, але практичне проявлення цього забруднення може впливати на екологічний стан прилеглих територій регіону дислокації полігонів Сухопутних військ.

Для проведення оцінки і прогнозування впливу забруднень воєнно-техногенного походження на екологічний стан складної ВПТГС (Davydchuk et al., 2004;

Данилюк і Туровець, 2015) доцільно застосувати процедуру ландшафтного профілювання, яка дозволяє створити математичні моделі ландшафтних профілів завдяки процедурам інтерполяції поверхонь і шарів профілів, визначити їх відповідність формам рельєфу, літологічній основі та рівню залягання ґрунтових вод.

Розглянемо приклад математичного моделювання та експертної екологічної оцінки забруднення від ВТН із проведенням ландшафтного профілювання території для ВП ракетних військ і артилерії "Дівички". Полігон займає фронтальну та центральну частини Київловського ландшафту першої надзаплавної тераси Дніпра, яка з півдня обмежена урізом Канівського водосховища. Надзаплавна тераса складена переважно пісками потужністю від 0,8 до 2 м з дерново-підзолистими піщаними ґрунтами, що підстилаються безкарбонатними суглинками. На рис. 5 наведено зображення типових ландшафтних профілів, які перетинають котел артилерії і мішеневе поле директриси для стрільби прямою наводкою (зони інтенсивного воєнно-техногенного навантаження) та найбільш характерні для цієї території форми рельєфу. На профілях відображено геологічну будову і сучасний рослинний покрив.

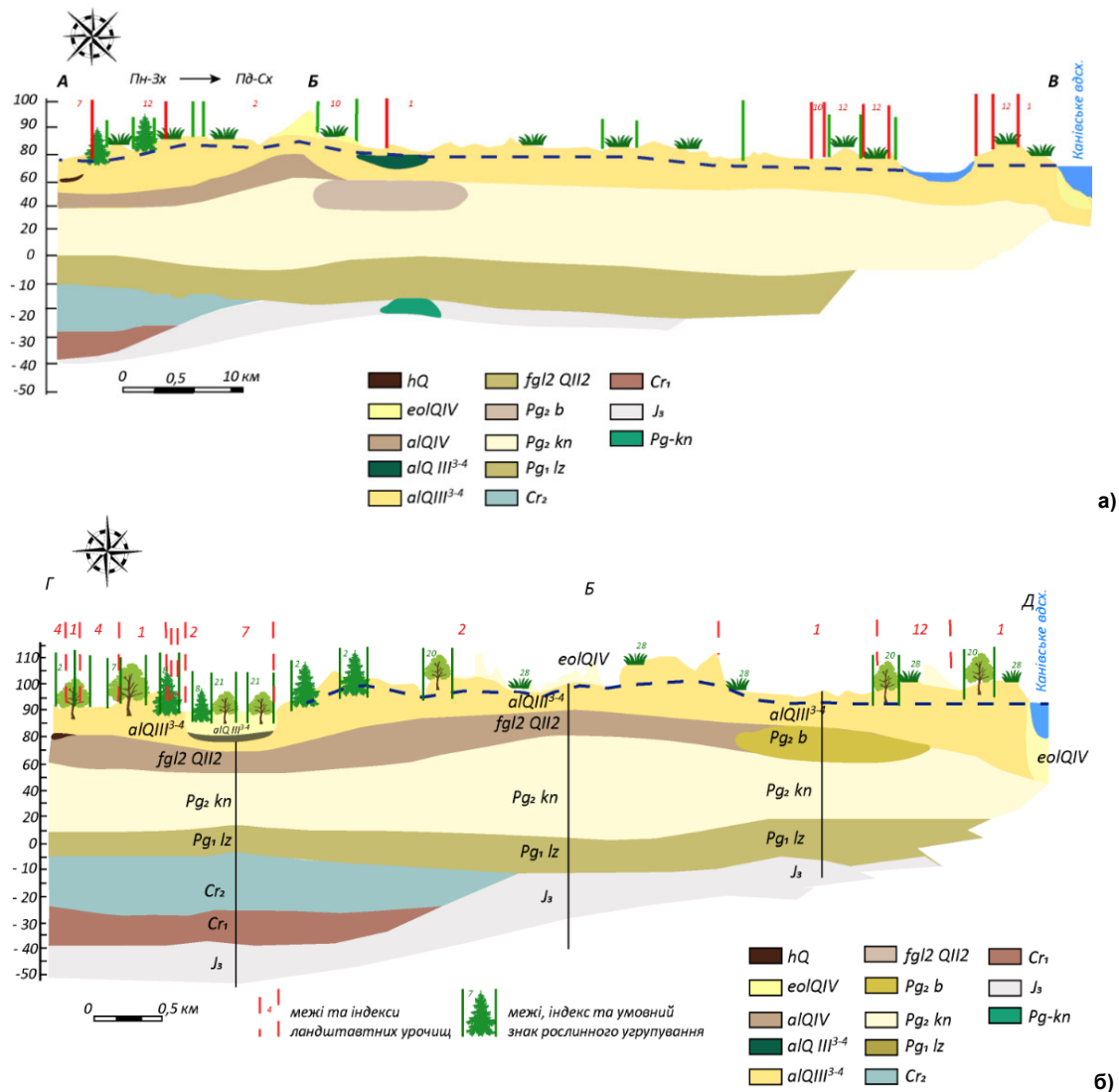


Рис. 5. Ландшафтні профілі:
а) профіль А-Б-В; б) профіль Г-Б-Д

Проведений аналіз забруднення ґрунтів речовинами воєнно-техногенного походження в місцях розташування функціональних підзон мішеневих полів навчальних об'єктів показав, що на них значення концентрацій деяких забруднюючих речовин перевищує встановлені норми у 5–20 разів (Томашевська, 2001; Davydkuk *et al.*, 2004; Данилюк і Туровець, 2015). Перед пробовідбором було проведено аналіз факторів воєнно-техногенного навантаження та складу забруднюючих речовин, які утворюються в результаті проведення заходів бойової підготовки у функціональних зонах військового полігону та підзонах навчальних об'єктів.

Польові дослідження на ВП показали, що забруднення його території носить зональний характер і групується навколо локальних підзон навчальних об'єктів, що залучаються до проведення та забезпечення заходів бойової підготовки з використанням озброєнь і військової техніки, а також є головними джерелами факторів ВТН.

При виборі ландшафтних профілів керувалися проведенням їх через місцевий вододіл, який представлений Вовчими буграми (котел артилерії та мішеневе поле директриси для стрільби прямою наводкою), до водоприймачів (Канівське водосховище та заплава й болото

Шкенделі). При цьому бралось до уваги, що вододіли та урізи водотоків (боліт тощо) є міграційними межами територій, де відбувається перебудова техногенних геохімічних ландшафтів.

Головна мета складання профілів – виявлення взаємозв'язків усередині природних територіальних комплексів і зв'язаності комплексів одного з одним. Ці завдання найуспішніше можуть бути вирішені із застосуванням геофізичних, геохімічних і математичних методів досліджень. Остаточні відповіді часто залежать від результатів обробки польових даних.

Для відпрацювання комп'ютерної технології з метою побудови математичних моделей профілів було застосовано регулярний крок обстеження високої частоти за лінією профілів. На першому етапі гіпсометрична крива ландшафтних профілів було складено за топографічною картою з подальшим польовим уточненням шляхом інструментальної зйомки в червні 2005 р. під час проведення польових досліджень на полігоні "Дівички".

Кількісні характеристики визначених концентрацій забруднюючих речовин-індикаторів за результатами хімічних аналізів проб, відібраних впродовж 2005–2018 р. на лінії профільного розрізу ВП "Дівички" наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Вміст забруднюючих речовин-індикаторів у функціональних зонах військового полігону, мг/кг

Точки пробовідбору	Функціональна зона чи підзона	Нітратний азот (мг/кг)	Нітрати (мг/кг)	Нітритний азот (мг/кг)	Аміак, мг/кг	Свинець Pb, мг/кг	Кадмій Cd, мг/кг
№6	Вогневі позиції	< 2,80	<12,4	-	-	89,6	2,13
№7	Мішеневе поле	-	-	12,7	56,3	102,0	3,05
№15	Придорожня смуга	-	-	-	-	103,2	2,05
№2	Буферна зона	< 2,80	<12,4	-	-	73,9	1,03
№4	Буферна зона	7,20	31,9	-	-	65,8	1,08
№13	Буферна зона	< 2,80	<12,4	-	-	72,0	1,03

Для адекватного відображення геоміграційних процесів доцільно використовувати детерміновано-ймовірнісні моделі, в яких фізико-математичний опис геофільтраційних процесів за допомогою диференціальних рівнянь модифікується шляхом стохастичного подання коефіцієнтів, що входять у ці рівняння. Цей спосіб дає змогу найбільш повно врахувати фізичну суть процесу та певну невизначеність щодо вимірюваних даних.

У класичному підході, який використовувався для визначення концентрації забруднюючої рідини в пористому середовищі, рівняння математичної моделі адвекції – дисперсії має вигляд (Яковлев *и др.*, 1994).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - v \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (1)$$

де D – коефіцієнт дисперсії, C – концентрація розчину, v – швидкість руху підземних вод, x – просторова координата, t – час.

Це рівняння виражає закон збереження маси забруднення у водоносному шарі. Середня лінійна швидкість, з якою рідина протікає через пористий водоносний шар, визначається таким рівнянням:

$$v = \frac{K}{\theta \mu} \frac{dh}{dx}, \quad (2)$$

де K – це гідрравлічна провідність середовища, θ – пористість середовища, μ – в'язкість рідини, $\frac{dh}{dx}$ – гідрравлічний градієнт. Значення гідрравлічного градієнта визначається з рівняння

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{K}{\mu} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = Q, \quad (3)$$

де Q – кількість рідини, що потрапила у ґрунт.

Отже, математичне моделювання процесу поширення техногенних забруднень у літосфері ВП складається з двох стадій: спочатку потрібно промодельовати процеси геофільтрації, за допомогою чого знаходять показники швидкості фільтрації. Після цього будується міграційна модель, виходячи з основних положень сучасної теорії геоміграційних процесів (Безуглий *та ін.*, 2004; Лисиченко *и др.*, 1988).

У вищезрозглянутій узагальненій моделі транспортування забруднень у ґрунтах розглядається виключно пористе середовище, що є характерним для ВП "Дівички", для якого виконуються умови щодо суцільності середовища. Результати тестування засвідчили (Томашевська, 2001), що класичну модель геоміграції можна застосовувати для алювіальних геологічних відкладів (піски, суглинки, вапняки та ін.) та літфікованих пористих порід (пісковики, вапняки тощо).

Джерела воєнно-техногенного забруднення, які утворюються на НО внаслідок заходів БП, мають за своєю природою специфічний характер. Насамперед вони здійснюють активний вплив на фізичні та механічні характеристики середовища, в яке проникає хімічне забруднення. Їхній вплив на абіотичну складову НПС носить імпульсно-точковий характер. Тому при моделюванні права частина рівняння (3) має бути представлена у вигляді комбінації узагальнених функцій типу δ -функції Дірака (Томашевська, 2001):

$$f(x, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \delta(t - t_i) \cdot \delta(x - x_j) \cdot \varphi_{ij}(t, x), \quad (4)$$

де t_i – момент викиду забруднюючих речовин (моменти виконання вогневих завдань); x_j – координати розташування точкового джерела викиду (координати розташування мішеневих полів, вихідних позицій для стрільби тактичною зброєю); φ_{ij} – інтенсивність викиду забруднюючих речовин. Інтенсивність викиду можна оцінити, наприклад, за формулою

$$\varphi_{ij} = 0,7 \cdot k_{BB} \cdot n \cdot \bar{\omega}_{BB} \cdot \bar{\rho}_{BB}, \quad (5)$$

де k_{BB} – коефіцієнт утворення газоподібних викидів; $\bar{\omega}_{BB}$ – маса розривного заряду; $\bar{\rho}_{BB}$ – щільність вибухової речовини; n – кількість снарядів для виконання вогневого завдання.

Наведені вище формули застосовано при моделюванні поширення воєнно-техногенних забруднень, що виникають у котлі артилерії та на мішеневих полях, оскільки основним джерелом забруднення в цьому випадку

виступають продукти вибуху боєприпасу, що утворюються під час артилерійських стрільб.

Так, унаслідок ударної дії вибуху снарядів ґрунт у місцях розташування котлів артилерії та мішеневих полів деформується, рухається, плавиться, що в результаті призводить до утворення штучного тріщинувато-пористого середовища зі стохастичним розподілом тріщин, яке змінюється після кожного вибуху. Отже, можна вважати, що для моделювання поширення забруднення на військових полігонах потрібно застосовувати математичні моделі, в яких геометричне розташування тріщин не враховується явним чином, а визначається через стан деяких фізичних характеристик середовища (наприклад, осереднені в межах ділянок породного масиву значення проникності, пористості тощо).

У пакеті PDE Toolbox системи комп'ютерної математики MatLab 7.1.4 було проведено імітаційне моделювання поширення забруднень у ландшафтних профілях котла артилерії. На рис. 6 наведено картину зміни концентрації розчину забруднюючих речовин на профілі ландшафту до першого горизонту ґрунтових вод на момент часу $t = 90$ днів від моменту інтенсивного сніготанення.

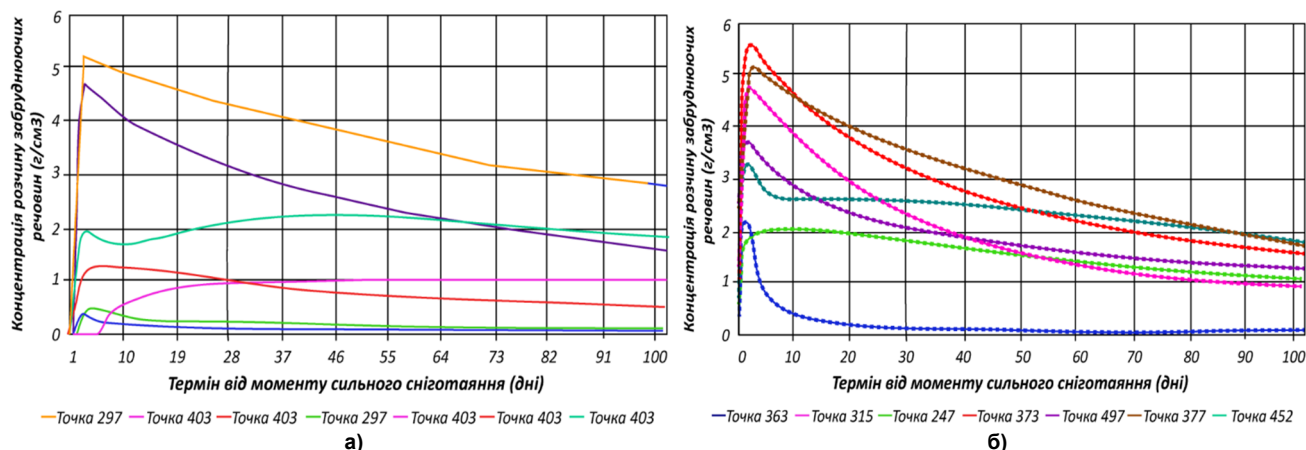


Рис. 6. Результати моделювання зміни концентрацій розчину забруднюючих речовин за профілем місцевості (а – АБВ, б – ГБД) протягом 100 днів

Для оцінки динаміки поширення забруднень за даними математичного моделювання в пакеті PDE Toolbox системи MatLab 7.1 було отримано залежності зміни концентрацій розчину забруднюючих речовин при поширенні його по ландшафтних профілях котла артилерії.

Отримані дані свідчать, що в межах території впливу значної кількості НО залежно від стану щільності та проникності порід зони ненасиченої фільтрації зростає уразливості підземних вод (УПВ) до геохімічних чинників ВТН. Загалом термін "уразливість підземних вод", як нижня гідрогеохімічна межа військової природно-техногенної геосистеми "військовий полігон – навколишнє природне середовище", наближається за фізичним змістом до поняття "стійкості геологічного середовища" і багатьма авторами розглядається як комплекс природних властивостей, що формують характер реакції верхньої зони літосфери на воєнно-техногенні впливи (Яковлев *и др.*, 1994). Але стосовно полігонів фактори УПВ та їх екологічна ідентифікація вимагають додаткового вивчення, враховуючи широке розмаїття гідрогеофільтраційних умов ВП України.

Впровадження підходів фреймової організації в процедуру інфогеологічного моделювання. Метою впровадження цього методичного апарату має бути оптимізація структуризації ГС об'єкта, що забезпечить підвищення

роздільної здатності і загальної адекватності інфогеологічної моделі. Наразі нами визначено лише загальний ІГФ найвищого рангу за зовнішнім форматом об'єкта як локальної структурної одиниці.

За результатами моделювання гідрогеохімічної міграції забруднюючих речовин можна зробити висновок про можливість оцінки УПВ шляхом розрахунку такого співвідношення:

$$R = f\left(\frac{Q}{D}\right), \quad (6)$$

де R – показник рівня УПВ (порівняльний показник ризику забруднення ґрунтових вод у зоні впливу НО), Q – показники кількості забруднюючої речовини, що потрапила у ґрунт (рівняння 3–5); D – узагальнений параметр захисної здатності системи "ґрунт – породи зони ненасиченої фільтрації" (можуть бути враховані параметри фільтраційного опору, сорбційної здатності та ін.).

Висновки. Актуальність представленої авторської концепції інформаційного забезпечення досліджень та робіт щодо поводження з геологічною складовою територій ВД полягає у формуванні наукової основи для проведення досліджень та робіт з відновлення екологічної безпеки територій, які зазнали впливу ВД.

Методологічна база теорії інформаційного забезпечення досліджень та робіт щодо поводження з геологічною складовою територій ВД полягає в розробці типізації порушень ГС у результаті ВД з виділенням типів ВД і форм їх впливу на ГС, встановленням механізму та прогнозом розвитку геосистем. Методологічна основа полягає в розробці принципів інформаційних моделей порушень ГС, які служать основою для визначення методів і технологій ліквідації наслідків порушення ГС, тобто відновлення ГС.

Подальший розвиток цього напрямку передбачається здійснювати в двох аспектах: розробка основних положень теорії інфогеології на базі вітчизняного та світового досвіду з урахуванням інноваційних методологій і методів інфогеології і, зокрема, – фреймової організації ГС, а також впровадження методичних розробок у практику дослідження робіт з відновлення територій військової діяльності в Україні.

За всіх несприятливих організаційно-фінансових передумов світові тенденції пріоритету збереження навколишнього середовища для створення безпечних умов для проживання людства висувають проблеми відновлення ГС територій ВД в авангардний ряд невідкладних завдань для сталого розвитку світової спільноти.

Список використаних джерел

- Безуглий, М.М., Никипорець, Е.М., Лисовський, В.Г. (2004). Розрахунок радіусів розльоту продуктів вибуху та формування закономірностей поля розльоту боєприпасів для розрахункової підсистеми контуру логістики АСУ ВМС "Херсонес". *Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України*, 4 (29), 125-137.
- Вентцель, Е.С. (1962). Теория вероятностей. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы.
- Горев, Л.Н., Коваленко, П.И., Лаврик, В.И. (1999). Гидроэкологические модели. Книга 1. Киев: Аграрная наука.
- Гришин, А.М. (2001). Моделирование и прогноз экологических катастроф. *Экологические системы и приборы*, 2, 28-33.
- Данилюк, С.Л., Туровець, Ю.С. (2015). Оцінка розповсюдження забруднень у зонах інтенсивного військово-техногенного навантаження військових полігонів Сухопутних військ. *Військово-технічний збірник*, (13), 111-119.
- Эйхгоф, П. (1975). Основы идентификации систем управления. Москва: Мир.
- Клемин, В.В., Луценко, Г.П., Ременсон, В.А. (2000). Обеспечение экологической безопасности при повседневной деятельности воинских частей и подразделений. Учебное пособие. Москва: МО РФ.
- Лисиченко, Г.В., Луцки, А.В., Яковлев, Е.А. (1988). Формирование режима подземных вод в районах развития активных геодинамических процессов. Киев: Наукова Думка.
- Лисенко, О.І., Чеканова, І.В., Чумаченко, С.М., Турейчук, А.М. (2004). Про розвиток поняття воєнної екології. *Наука і оборона*, 3, 27-33.
- Петрашин, Л.Ф., Лысяный, Г.Н. (1986). Охрана окружающей среды. Москва: Недра.
- Романченко, І.С., Сбитнев, А.І., Чумаченко, С.М., Слободяник, В.А. (2006). Управління станом природного середовища полігонів ЗС України: *Заключний звіт пілотного проекту*. Київ: ЗАТ "Космоснімок".
- Свешников, А.А. (1965). Прикладные методы теории случайных процессов. Москва: Наука.
- Томашевська, Т.В. (2001). Математичне моделювання процесів фільтрації в екологічно небезпечних зонах. *Збірник наукових праць*. Київ: ННДЦ ОТ і ВБ України, 5, 225-228.
- Хрущов, Д.П., Ремезова, Е.А., Белевцев, Р.Я., Яковлев, Е.А., Азимов, А.Т., Иванова, А.В., Лобасов, А.П., Босевская, Л.П., Греку, Р.Х., Почтаренко, В.И., Охолина, Т.В. (2019). Формационные алгоритмы теории информационного обеспечения исследований и работ по обращению с геологической средой. *Геоинформатика*, 1, 70-79.
- Хрущов, Д.П., Ковальчук М.С., Ремезова Е.А. и др. (2017). Структурно-литологическое моделирование осадочных формаций. Киев: Интерсервис.
- Хуторский, М.Д. (1999). Мониторинг и прогнозирование геофизических процессов и природных катастроф. Москва.
- Чумаченко, С.М. (2003). Методологічні основи проведення екологічної оцінки впливу бойової підготовки на довкілля військових полігонів. *Збірник наукових праць*. Київ: ННДЦ ОТ і ВБ України, 20, 105-115.

Шеннон, Р. (1978). Имитационное моделирование систем – искусство и наука. Москва: Мир.

Яковлев, Е.А., Лютий, Г.Г., Почтаренко В.И. и др. (1994). Временное методическое руководство по проведению комплексных эколого-геологических исследований (на территории Украины). Киев: ГТП "Геопротоз".

Davydchuk, V., Chumachenko, S., Dudkin, O., Sytnik, Y., Nesterenko, S., Marynin, I., Slobodyanyk V., Yakovenko, O., Osadcha, O. (2004). Pilot project "Ecological assessment of the military training center "Divychky" and developing a framework for ecologically sound ecosystem management of military areas in Ukraine in frame of program of scientific substantiation of rehabilitation and nature management on divychky military training area in 2004-2006. Kiev.

References

- Bezuhlyi, M.M., Nykyporets, E.M., Lisovskyi, V.H. (2004). Calculation of the radii of flight of explosion products and the formation of patterns of the field of spread of ammunition for the calculation subsystem of the logistics circuit of the AMS "Chersonese". *Collection of scientific works of the Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine*, 4 (29), 125-137. [in Ukrainian]
- Chumachenko, S.M. (2003). Methodological bases of ecological assessment of the impact of combat training on the environment of military training grounds. *Collection of scientific works*. Kyiv: NNDC OT and VB of Ukraine, 20, 105-115. [in Ukrainian]
- Davydchuk, V., Chumachenko, S., Dudkin, O., Sytnik, Y., Nesterenko, S., Marynin, I., Slobodyanyk V., Yakovenko, O., Osadcha, O. (2004). Pilot project "Ecological assessment of the military training center "Divychky" and developing a framework for ecologically sound ecosystem management of military areas in Ukraine in frame of program of scientific substantiation of rehabilitation and nature management on divychky military training area in 2004-2006. Kiev.
- Danyliuk, S.L., Turvets, Yu.S. (2015). Assessment of the spread of pollution in areas of intensive military-man-made load of military training grounds of the Land Forces. *Military-Technical Collection*, (13), 111-119. [in Ukrainian]
- Eykhof, P. (1975). Fundamentals of identification of control systems. Moscow: Mir. [in Russian]
- Grishin, A.M. (2001). Modeling and forecasting environmental disasters. *Environmental systems and devices*, 2, 28-33 [in Russian]
- Gorev, L.N., Kovalenko, P.I., Lavrik, V.I. (1999). Hydroecological models. Book 1. Kiev: Agricultural Science. [in Russian]
- Hruschov, D.P., Remezova, E.A., Belevtsev, R.Ya., Yakovlev, E.A., Azimov, A.T., Ivanova, A.V., Lobasov, A.P., Bosevskaya, L.P., Greku, R.H., Pochtarenko, V.I., Oholina, T.V. (2019). Formation algorithms of the theory of information support for research and work on the handling of the geological environment. *Geoinformatics*, 1, 70-79. [in Russian]
- Hruschov, D.P., Kovalchuk M.S., Remezova E.A. et al. (2017). Structural and lithological modeling of sedimentary formations. Kiev: Interservice. [in Russian]
- Hutorskiy, M.D. (1999). Monitoring and forecasting of geophysical processes and natural disasters. Moscow. [in Russian]
- Klemin, V.V., Lutsenko, G.P., Remenson, V.A. (2000). Ensuring environmental safety in the daily activities of military units and subunits: Textbook. Moscow: Ministry of Defense of the Russian Federation. [in Russian]
- Lisichenko, G.V., Lushchik, A.V., Yakovlev, E.A. (1988). Formation of the groundwater regime in areas of development of active geodynamic processes. Kiev: Naukova dumka. [in Russian]
- Lysenko, O.I., Chekanova, I.V., Chumachenko, S.M., Tureichuk, A.M. (2004). On the development of the concept of military ecology. *Science and defense*, 3, 27-33. [in Ukrainian]
- Petryashin, L.F., Lyisyanyiy, G.N. (1986). Environmental protection. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Romanchenko, I.S., Sbitniev, A.I., Chumachenko, S.M., Slobodanyk, V.A. (2006). Environmental Management of Landfills of the Armed Forces of Ukraine. *Final Report of the Pilot Project*. Kyiv: CJSC "Cosmozniomik". [in Ukrainian]
- Shennon, R. (1978). Simulation of systems - art and science. Moscow: Mir. [in Russian]
- Sveshnikov, A.A. (1965). Applied methods of the theory of random processes. Moscow: Science. [in Russian]
- Tomashevskaya, T.V. (2001). Mathematical modeling of filtration processes in ecologically dangerous zones. *Collection of scientific works*. Kyiv: NNDC OT and VB of Ukraine, 5, 225-228. [in Ukrainian]
- Venttsel, E.S. (1962). Probability theory. Moscow: State Publishing House of Physics and Mathematics. [in Russian]
- Yakovlev, E.A., Lyutyiy, G.G., Pochtarenko V.I. et al. (1994). Temporary methodological guidance for conducting complex ecological and geological research (on the territory of Ukraine). Kiev: State Enterprise "Geoprognosis". [in Russian]

Надійшла до редколегії 12.12.21

D. Khrushchov, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine,
Kyiv, 01054, Ukraine;
S. Chumachenko, Dr. Sci. (Tech.),
E-mail: sergiy23.chumachenko@gmail.com,
National University of Food Technologies,
Kyiv, 01033, Ukraine;
V. Zatserkovnyi, Dr. Sci. (Tech.),
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com;
P. Trofymenko, Dr. Sci., (Agr.), Assoc. Prof.,
E-mail: trofimenkopetr@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
A. Splodytel, Cand. Sci. (Geogr.), Doctoral Student,
E-mail: asplodytel@gmail.com,
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine,
34 Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR INFOGEOLOGICAL MODELING OF MILITARY ACTIVITY TERRITORIES

The purpose of the study is to elaborate framework of infogeological modeling of the military activity territories (using territorial objects in Ukraine) to provide informational support of research and works on the treatment of the geological environment of territories of military activity. The main methodological instrument of informational support of research and works on the treatment of the geological environment of territories of military activity is information modeling. Given the local level of military activity territories, the complex ecological and geological model serves as the primary methodological technique. Methods developed on this paradigm's principles aim to eliminate the consequences of military activity and restore the territories of the military conflicts. Ground research was developed using conceptual models, particularly checking main components of these models that aim at determining the indetermination. To identify the influence of the military activity sources, we used the Leopold Matrix and Sorensen Level Diagram, network diagram, method of the combined analysis of maps, and factor analysis. The evaluation of the spread of factors of military and technogenic load of chemical origin in the functional zones and subzones of the military polygon was carried out based on the complex approach to the ecological evaluation of the contamination of the territories of intensive military and technogenic load using the landscape profiling and imitating modeling taking into account geochemical and hydrometeorological conditions. The analysis of the soils, contaminated with military and technogenic origin substances in the places of functional subzones locations targeted fields of military polygon showed the indicators of concentration of some of the contaminating substances exceed norms 5-20 times. Field research in military polygon showed that contamination of its territory has zonal character and is grouped around local subzones of the military object where military preparation using armaments and military equipment is carried out, being the primary source of factors of military and technogenic load of the geological environment. Prospects for further development of this field lie in developing the integral theory of infogeological modeling of geological environment of military activity territories, oriented at the evaluation of different types of influences and threats.

Keywords: geologic environment, infogeologic modeling, infoframe, military polygon.

Д. Хрущов, д-р геол.-минералог. наук, проф.,
Институт геологических наук НАН Украины,
ул. О. Гончара, 55-б, г. Киев, 01054, Украина;
С. Чумаченко, д-р техн. наук,
E-mail: sergiy23.chumachenko@gmail.com;
Национальный университет пищевых технологий,
ул. Владимирская, 68, г. Киев, 01033, Украина;
В. Зацерковный, д-р техн. наук,
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com;
П. Трофименко, д-р с.-х. наук, доц.,
E-mail: trofimenkopetr@ukr.net;
Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
А. Сплодитель, канд. геогр. наук, докторант,
E-mail: asplodytel@gmail.com,
Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. М.П. Семененко НАН Украины,
пр. Ак. Палладина, 34, г. Киев, 03142, Украина

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИНФОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ВОЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Целью исследования является разработка положений infoгеологического моделирования территорий военной деятельности (на примере территории Украины) для информационного обеспечения исследований и работ по обращению с геологической составляющей исследуемых территорий. Основным методологическим инструментом является информационное моделирование. Учитывая преимущественно локальный уровень масштабности территорий военной деятельности, главным методическим приемом служит комплексная эколого-геологическая модель. Методы, разработанные на принципах этой парадигмы, направлены на ликвидацию последствий военной деятельности и восстановление территорий вооруженных конфликтов. Наземные исследования разработаны с использованием концептуальных моделей и проверкой основных компонентов этих моделей, нацеленных на идентификацию ими неопределенностей. Оценка распространения факторов военно-техногенной нагрузки химического происхождения в функциональных зонах и подзонах военного полигона осуществлялась на основе комплексного подхода к эколого-геохимической оценке загрязнения территорий интенсивной военно-техногенной нагрузки, с применением ландшафтного профилирования и имитационного моделирования с учетом геохимических и гидрометеорологических условий. Проведенный анализ загрязнения почв веществами военно-техногенного происхождения в местах расположения функциональных подзон мишеней военного полигона показал, что значение концентрации некоторых загрязняющих веществ превышает установленные нормы в 5–20 раз. Полевые исследования на военном полигоне демонстрируют зональный характер загрязнения, который группируется вокруг локальных подзон военного объекта, привлекаемых к проведению и обеспечению мероприятий боевой подготовки с использованием вооружения и военной техники, а также является главным источником военно-техногенной нагрузки на геологическую среду. Перспективы дальнейшего развития направления заключаются в разработке целостной теории infoгеологического моделирования геологической среды территорий военной деятельности, которая ориентирована на оценку различных типов воздействий и угроз.

Ключевые слова: геологическая среда, infoгеологическое моделирование, военный полигон.

УДК 556.506; 620.92; 620.987
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.13>

О. Зур'ян, канд. техн. наук, наук. співроб.,
E-mail: alexey_zuryan@ukr.net;
А. Баріло, наук. співроб.,
E-mail: geotherm@ukr.net;
Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Г. Хоткевича, 20-а, м. Київ, 02094, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІДРОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК ЗАКРИТОГО ТА ВІДКРИТОГО ТИПУ З РІЗНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОЇ ЕНЕРГІЇ

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

Присвячено новому напрямку використання вод верхніх водоносних горизонтів і відкритих водоймищ для тепло- і холодопостачання житлових і громадських будівель та споруд. Наведено теоретичний аналіз технологій побудови та особливостей використання природних акумуляторів теплової енергії у водоносних горизонтах та відкритих водоймах. Описано загальні схеми побудови гідротермальних теплонасосних систем закритого та відкритого типу. Представлено розроблену і сконструйовану в Інституті відновлюваної енергетики НАНУ гідротермальну експериментальну теплонасосну систему, яка складається з теплового насоса та двох свердловин, завглибишки 49,5 м та 57,5 м, через які забезпечується циркуляція води між підземним горизонтом та тепловим насосом. Проведено аналіз геолого-гідрогеологічних умов ділянки дослідження. Описано особливості формування запасів підземних вод продуктивного горизонту. Визначено подальші напрями проведення гідрогеологічних спостережень.

Науково обґрунтовано ефективність гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу. Описано методику проведення досліджень. Наведено характеристики вимірювального обладнання, встановленого на гідротермальній системі, і програмного забезпечення, яке використовувалося для архівації та візуалізації даних, отриманих у процесі проведення науково-дослідницької роботи.

Наведено результати проведених експериментальних досліджень. Проведено порівняльний аналіз ефективності та інвестиційної привабливості гідротермальної системи відкритого та закритого типу, де як відновлюване первинне джерело теплової енергії для роботи теплового насоса використовується низькопотенціальна теплова енергія води.

Встановлено, що використання відновлюваної низькопотенціальної енергії ґрунту для роботи геотермальних енергетичних систем широко застосовується в екологічно безпечних та економічно вигідних енергетичних системах. Разом з тим використання гідроенергетичного потенціалу в гідротермальних теплонасосних системах не має широкого застосування незважаючи на високі технічні та економічні показники. Доведено, що наявні гідротермальні теплонасосні системи не завжди адаптовані до умов експлуатації та місця розташування об'єкта. Відсутні методики проєктування гідротермальних теплонасосних систем відкритого типу, методики проведення попередніх гідрогеологічних досліджень району, запланованого для монтажу цих систем, та методики розрахунку параметрів акумулюючого середовища.

Отримані в ході дослідження дані мають важливе наукове і прикладне значення при проєктуванні гідротермальних теплонасосних систем. Крім того, мають перспективу подальші дослідження можливостей та ефективності використання водоносного горизонту як природного акумулятора теплоти для стабілізації генерування енергії від відновлюваних джерел незалежно від кліматичних умов і пори року.

Ключові слова: тепловий насос, гідротермальна система, водоносний горизонт, низькопотенціальна енергія води.

Постановка проблеми. Використання поверхневих вод відкритих водоймищ та верхніх водоносних горизонтів з енергетичною метою – це реальність нашого часу. Згідно з даними Всесвітнього геотермального конгресу, на початок 2020 р. встановлена теплова потужність геотермальних теплонасосних установок (ТНУ), які як первинне джерело енергії використовують теплову енергію повітря, ґрунту, підземних і поверхневих вод, значно перевищила потужності традиційних глибинних геотермальних теплових станцій і досягла позначки 78 ГВт. На сьогодні у світі існує понад 6,5 млн таких установок. Більшість з них малої потужності (середня – 12 кВт) і використовується для теплопостачання і кондиціювання індивідуальних житлових будівель, рідше – інституційних і комерційних установ (Lund and Aniko, 2021).

В Україні в останні роки також спостерігається стрімке зростання впровадження в системи теплопостачання геотермальних теплових насосів, що використовують низькопотенціальні джерела енергії, однак статистичний облік таких установок практично не ведеться. Тому на сьогодні в країні достеменно невідомий ні рівень сумарної встановленої потужності, ні його поділ за джерелами низькопотенціальної теплоти. Однак, згідно з оцінюванням, проведеним на основі даних фіскального обліку митної служби нашої країни щодо імпорту теплових насосів та їх комплектуючих, сумарна теплова потужність теплових насосів, які зараз використовуються в Україні, приблизно дорівнює 1800 МВт (Кудря, 2020).

Аналіз статистичних даних показує, що за період з 2004 по 2020 р. витрати на сплату комунальних послуг (без врахування плати за обслуговування будинку та прибудинкової території) збільшилися більше ніж в 30 разів. Зрозуміло, що така ситуація викликає пошук нових альтернативних методів опалення та гарячого водопостачання, одним з яких є застосування теплонасосних установок, що використовують низькопотенціальні геотермальні джерела енергії. Особливо це стосується споживачів, що мають індивідуальну систему теплопостачання.

Зростанню впровадження теплонасосних технологій у систему індивідуального теплопостачання також сприяє відсутність необхідності землевласникам і землекористувачам мати спеціальні дозволи та гірничі відводи на відбір підземних вод на своїх ділянках за умови, що обсяги видобування підземних вод не перевищують 300 м³/доб. (Стаття 23 Кодексу України про надра).

Тому пошук перспективних шляхів розвитку техніки та технологій на основі використання енергії відновлюваних джерел, у т. ч. низькопотенціальної геотермальної енергії, є однією з проблем, розв'язання якої в Україні дасть гарантію енергетичної безпеки та незалежності держави (Кудря, 2004).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки питанням досвіду використання теплонасосних систем в Україні та світі, де як первинне джерело енергії використовується низькопотенціальна енергія приповерхневих шарів Землі, присвячена велика кількість

© Зур'ян О., Баріло А., 2022

досліджень. Аналіз ефективності різних типів теплонасосних систем наведено в роботах (Долінський та Драганов, 2008; Морозов та ін., 2017; Гошовський та Зур'ян, 2013; Попов, 2005; Laloui et al., 2006; Елістратов, 2011; Яценко, 2017). Сукупність математичних моделей, що дозволяють розраховувати процеси тривалого акумулювання теплоти в навколишньому природному середовищі з подальшим її видобуванням, наведено в монографії (Накорчевський, 2010). Ефективність застосування теплонасосних технологій, де як первинне джерело теплової енергії використовується теплота приповерхневих шарів Землі, досліджувалася в роботах (Matos et al., 2019; Deng et al., 2020; Kim and Lee, 2020; Zurian 2019; Лусак, 2020). Інноваційні конструкції геотермальних теплообмінників розроблені та описані в дослідженнях (Федянін та Карпов, 2006; Кіріченко, 2014; Гошовський та Зур'ян, 2015). У роботах (Шубенко та Кухарець, 2014; Morrison et al., 2004; Hepbasli and Kalinci, 2009) автори науково довели, що безпосередньо тепловий насос як складова частина теплонасосної системи є екологічно чистим пристроєм, основною функцією якого є переміщення низькотемпературної енергії від відновлюваного джерела до системи теплозабезпечення будівлі зі значенням температури та потужності, необхідним для споживання, та зроблено припущення, що техногенне навантаження на довкілля та екологічну небезпеку можуть нести теплофізичні процеси, що відбуваються в системі геотермальний теплообмінник – ґрунт. Перспективи використання геотермальних технологій на території Чорнобильської зони відчуження досліджено в роботі (Барилло, 2017). В останні роки розпочато активні науково-дослідницькі роботи з вивчення фізичних особливостей та енергетичної ефективності використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- та холодопостачання (Малкін та Колінко, 2014; Морозов та ін., 2019). Крім того, активно проводяться дослідження щодо застосування як теплового акумулятора для роботи теплонасосної системи відкритих водойм. Є приклади ефективного використання таких гідротермальних теплонасосних систем з теплообмінниками, встановленими на дно водойми (Goshovsky and Zurian, 2013).

Виділення нерозв'язаних раніше частин проблеми. Одним з варіантів економії енергоресурсів є використання для теплопостачання низькопотенційних джерел тепла за допомогою теплових насосів. Цей метод екологічно безпечний і досить дешевий. Основна відмінність теплового насоса від інших перетворювачів відновлюваної енергії полягає в тому, що при виробництві тепла до 80 % енергії вилучається з навколишнього середовища: ґрунту, води, повітря.

Теплові насоси в холодну пору року опалюють приміщення, а в теплу пору року використовуються для охолодження повітря в будинку. У такому випадку тепло з повітря приміщень будинку забирається та передається назад у ґрунт, повітря чи у водоймище. Багатофункціональність використання є однією з найважливіших переваг теплових насосів.

Тепловий насос фактично перекачує тепло з контуру приєднаного до джерела відновлюваної енергії до контуру поєднаного з системою теплозабезпечення будівлі. Ефективність використання теплового насоса залежить від його коефіцієнта перетворення, який визначається відношенням кількості тепла, отриманого від теплового насоса, до витрат енергії для роботи компресора (приводу) теплового насоса. Цей коефіцієнт може бути від 2,5 до 5 для різних типів теплових насосів.

Однак така система має і недоліки, які визначаються суттєвою залежністю її ефективності від температури на вході у випарник та на виході з конденсатора теплового насоса. Тому на ефективність роботи теплонасосних установок передусім впливає природа первинного джерела теплової енергії та конструктивні особливості системи теплозабезпечення будівлі.

Залежно від способу відбору теплоти від первинного джерела енергії усі теплонасосні системи поділяються на:

- відкритого типу, в яких природний теплоносіє (повітря, води підземних водоносних горизонтів або поверхневих водоймищ) безпосередньо подаються до випарника теплового насоса;

- закритого типу, в яких для використання первинної низькопотенційної енергії ґрунту, поверхневих або підземних вод застосовується додатковий контур (колектор-теплообмінник), в якому циркулює холодоагент, що здійснює "відбір" теплової енергії від первинного джерела енергії та перенос її до випарника теплового насоса.

Мета дослідження. На підставі порівняльного аналізу енергетичних показників двох дієвих експериментальних теплонасосних установок закритого та відкритого типів визначити найефективніший спосіб освоєння низькопотенційних геотермальних ресурсів з урахуванням природи первинного джерела теплової енергії та конструктивних особливостей системи видобування.

Виклад основного матеріалу дослідження. На сьогодні існує ряд теплонасосних енергетичних систем, які використовують теплообмінники для забору первинної низькопотенційної теплової енергії :

1. Геотермальна теплонасосна енергетична система закритого типу з горизонтальним ґрунтовим колектором.
2. Геотермальна теплонасосна енергетична система закритого типу з вертикальним ґрунтовим колектором.
3. Гідротермальна теплонасосна система закритого типу з горизонтальним водяним колектором-теплообмінником, розміщеним на дні водойми.

Разом з тим теплообмінники, що використовуються в усіх цих системах, мають ряд недоліків, основним з яких є мала величина теплоті, що пов'язана з низькою теплопровідністю ґрунтового масиву. Залежно від складу і вологості порід питомий теплоті з одного погонного метра ґрунтового теплообмінника становить від 20 до 80 Вт/м. Відповідно, при опалювальній площі будинку 100 м², для роботи теплового насоса потрібно 3–4 теплообмінника завдовжки до 50 м. Тому в багатьох районах України вищеперелічені теплонасосні системи характеризуються малою тепловою потужністю, тобто вони придатні для невеликих систем потужністю до 30 кВт. Крім того, для забезпечення теплохолодопостачання об'єктів доцільно використовувати системи з акумуляцією теплоти.

Альтернативою таким системам може стати:

4. Гідротермальна теплонасосна система відкритого типу, де як теплоносіє використовуються підземні води верхніх водоносних горизонтів, що розташовані від глибини залягання нейтрального шару (тобто поверхні постійних річних температур) до глибини 400 м.

Внаслідок відсутності поверхонь теплообміну цей тип низькопотенційних теплонасосних установок може забезпечити найкращі економічні характеристики серед підземних акумуляторів тепла. Однак такий спосіб освоєння низькопотенційного тепла ускладнюється тим, що вимагає при проектуванні системи теплопостачання враховувати гідродинамічні і теплофізичні характеристики конкретного водоносного горизонту, на основі якого така система створюється (Кіріченко, 2014).

Для проведення досліджень теплових і гідродинамічних процесів, що відбуваються в продуктивному водоносному пласті під час освоєння низькопотенційної енергії підземних вод верхніх водоносних горизонтів, в Інституті відновлюваної енергетики НАН України на прибудинковій ділянці корпусу 2, що розташований за адресою вул. Метрологічна, буд. 50, було створено Експериментальну систему видобування геотермальних джерел енергії типу ГЦС (геотермальна циркуляційна система). Експериментальна установка є теплообмінним пристроєм, який складається із: двох свердловин,

облаштованих водопідйомним обладнанням, з'єднаних трубопроводів для транспортування підземних вод та приладів контролю і вимірювання основних технологічних параметрів. Разом з тепловим насосом та приладами системи теплозабезпечення будівлі (фанкойлами, мережевими трубопроводами та циркуляційними насосами) експериментальна установка являє собою гідротермальну теплонасосну установку відкритого типу. Принципову схему дослідної установки зображено на рис. 1.

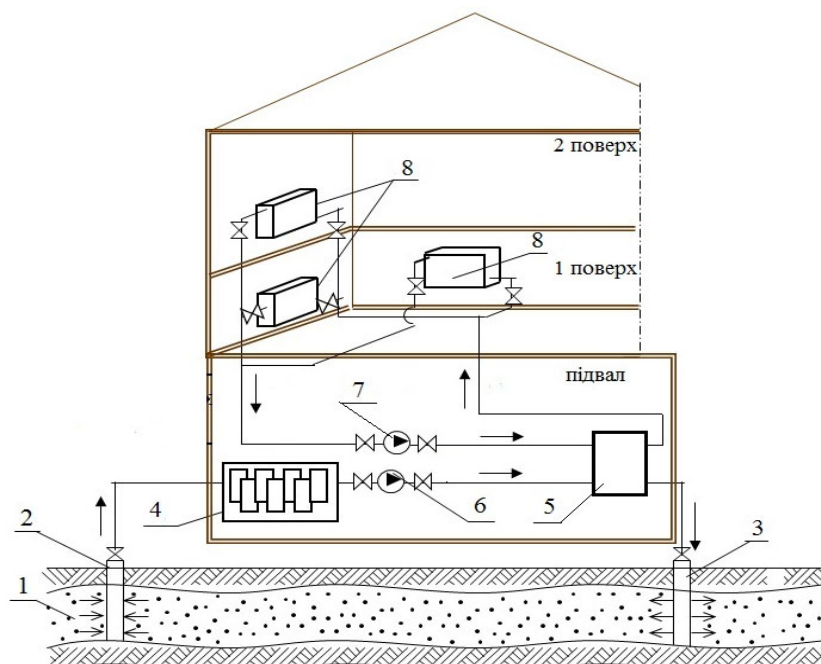


Рис. 1. Принципова схема експериментальної гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу:

1 – проникний підземний шар; 2 – видобувна свердловина; 3 – поглинальна свердловина; 4 – баки-акумулятори (7 шт.); 5 – тепловий насос; 6, 7 – циркуляційні насоси; 8 – фанкойли (3 шт.) (Морозов та ін., 2019)

Згідно з принциповою схемою експериментальна теплонасосна установка працює у двох режимах: в опалювальний сезон – для забезпечення теплом; у літній – для кондиціювання приміщень.

У режимі теплозабезпечення підземна вода верхнього водоносного горизонту із видобувної свердловини (2) за допомогою занурювального насоса відкачується на поверхню, далі по трубопроводу через баки-акумулятори (4) надходить у випарник теплового насоса (5), де віддає частину свого теплового потенціалу (2-3°C) низькокиплячій рідині (холодоагенту), яка циркулює в замкнутому контурі теплового насоса, охолоджується і повертається через поглинальну свердловину (3) назад у продуктивний горизонт. Мережева вода системи теплозабезпечення будівлі за допомогою циркуляційного насоса (6,7) надходить до конденсатора теплового насоса (5), забирає тепло у низькокиплячій рідині та надходить до опалювальних пристроїв (фанкойлів) системи тепlopостачання (8) (рис. 1). Зазначимо, що залежно від типу теплового насоса та виду холодоагенту температура в конденсаторі може досягати 60–120° С. Потім цикл повторюється.

У режимі кондиціювання підземна вода з видобувної свердловини через баки-акумулятори в обхід теплового насоса подається безпосередньо в мережу системи теплозабезпечення, а саме до фанкойлів, які в цьому

випадку функціонують як прилади кондиціювання. Підземна вода забирає надлишок теплової енергії з повітря приміщень, нагрівається і повертається через нагнітальну свердловину назад у водоносний горизонт. Після чого цикл повторюється, чим забезпечується створення комфортних умов перебування людей та роботи техніки в літній період.

Як зазначалось вище, основною особливістю використання гідротермальних теплонасосних систем відкритого типу, де як теплоносії використовуються підземні води верхніх водоносних горизонтів, є існування передпроектного етапу, протягом якого необхідно провести відповідні дослідно-фільтраційні роботи та визначити природний режим продуктивного горизонту, його фільтраційні властивості та умови формування, а також оцінити експлуатаційні запаси підземних вод водоносного горизонту. Без проведення відповідних заходів неможливо визначити експлуатаційні характеристики установки і забезпечити стабільну її роботу протягом усього терміну експлуатації. Також ці дані необхідні для оцінки впливу експлуатації експериментальної установки на тепловий, гідродинамічний і екологічний стан продуктивного водоносного горизонту та на навколишнє середовище ділянки дослідження.

Геолого-гідрогеологічні умови ділянки дослідження. У геолого-структурному відношенні ділянка

дослідження розташована в межах північно-східного пологого схилу Українського щита, що занурюється під область Дніпровсько-Донецької западини. Товща порід має двоповерхову будову: нижній поверх – кристалічний фундамент, що складається з кристалічних і метаморфічних порід докембрію, верхній – чохол, складений осадовими породами палеозойського, мезозойського і кайнозойського віку, потужністю до 400 м.

У геоморфологічному відношенні ділянка експериментальної установки розташована на території останця київського лесового плато, який обмежений із заходу – Новоселицькою, з півдня – Хотівською і зі сходу – Феофаніївською балками. Абсолютні позначки дна балок змінюються від 125 до 150 м. З півночі останець з'єднується з основним масивом київського лесового плато.

На дні балок розташовані водотоки з озерами, що мають непостійний характер, який на пряму залежить від кількості атмосферних опадів. На дні Феофаніївської балки розміщується серія Паладинських ставків.

За формою останець являє собою "язик", довжина якого (напрямок з півночі на південь) становить приблизно 1,5 км, а ширина (напрямок із заходу на схід) – 1 км. Рельєф "язика" досить плоский. Абсолютні позначки поверхні змінюються від 189 до 175 м, вододіл проходить уздовж шосейної дороги (вул. Метрологічна). Ухил правого крила становить 0,02, лівий схил крутіший.

Гідрогеологічна будова ділянки дослідження досить детально вивчена завдяки численним буровим роботам, що були тут проведені.

Гідрогеологічний розріз за результатами буріння від земної поверхні в глибину представлений такими водоносними горизонтами і водотривкими шарами:

1. Алювіально-делювіальні відклади першої надзапальної тераси складається щільними (середня щільність порід 1,6 г/см³) піщанистими суглинками з включенням гравію і гальки, іноді з прошарками і лінзами піску. Водозбагаченість горизонту невисока, у складі водовмісних порід переважають пилюваті і глинисті фракції. Залягає горизонт на глибині від 8 до 12 м, має сезонний характер і дуже залежить від кількості атмосферних опадів, що випадають на місцевості.

2. Водоносний горизонт у відкладах межигірської, берекської та новопетрівської світ олігоцен-міоцену (полтавська і харківська серії). Шари водовмісних відкладень не обмежені між собою водоупорами, гідравлічно пов'язані і розглядаються як єдиний водоносний горизонт. Горизонт відокремлюється від першого шаром строкатих глин неогенового віку, товщина якого досягає 20 м. Покривля горизонту знаходиться на глибині 32 м, а підосва – 50 м. Складається горизонт із сірого дрібнозернистого піску з прошарками алевритів і глин. Статичні рівні встановлюються на глибині 48–49 м. Горизонт безнапірний, тобто рівень води знаходиться нижче кривлі горизонту, верхня частина товщі горизонту суха. Водозбагаченість горизонту слабка, що пояснюється малою водовіддачею дрібнозернистих пісків полтавської свити. На дослідній ділянці приплив підземних вод з полтавського горизонту під час відкачки у процесі буріння становив 2–3 л/с з відповідним зниженням рівня на 6–7 м.

3. Бучаксько-канівський водоносний горизонт залягає на глибині від 90 до 117 м, складається з мілкого та дрібнозернистого піску. Горизонт сильно виснажений через активне використання його для водопостачання і господарських цілей. Статичні рівні встановлюються на відмітках 96 м, тобто верхня частина горизонту суха. Горизонт безнапірний. Відокремлюється від другого потужною (до 35 м) товщею строкатих глин неогену.

Для експериментальної гідротермальної енергетичної теплонасосної системи відкритого типу продуктивним є полтавський водоносний горизонт.

У плані горизонт має повсюдне поширення. Згідно з гідрогеологічною картою, площа поширення горизонту перевищує десятки км². Абсолютні позначки підосви горизонту становлять 127–131 м. Покривля горизонту розміщується на відмітках 150–165 м. Спостерігається незначне занурення горизонту в південному напрямку (4 м на 700 м).

Зверху і знизу горизонт ізольований пластами водотривких глин. Товщина верхнього шару глин сягає 20 м, нижнього – перевищує 35 м. За даними (Ситніков та ін., 2003), через верхній шар глин відбувається часткова фільтрація води з першого водоносного горизонту в продуктивний. Кількісно величину перетікання встановлено не було. Однак середньорічна величина живлення першого водоносного горизонту за рахунок інфільтрації атмосферних опадів становила 5,2 см.

Зазначимо, що побудова житлового кооперативу "Кришталеві джерела", у межах якого розташована ділянка експериментальної установки, дуже змінила природні гідрогеологічні умови верхніх водоносних горизонтів. Площа останця була значно збільшена шляхом насипання штучного ґрунту, як зверху (1,5–2 м), так і в ширину (до 100–150 м). Крім того, будівництво багатоповерхових будівель, асфальтування доріг, створення каналізаційної мережі та організація поверхневого стоку однозначно зменшили інфільтрацію атмосферних опадів, а отже й умови живлення верхнього водоносного горизонту. Тому можна припустити, що величина перетікання підземних вод з першого горизонту незначна та нею можна знехтувати.

У Новоселицькій та Феофаніївській балках полтавський водоносний горизонт розкритий ерозією і виходить на денну поверхню. У цих місцях спостерігається гідравлічний зв'язок горизонту з поверхневими водоймами, що розташовані на дні балок. Живлення горизонту здійснюється безпосередньо за рахунок інфільтрації атмосферних опадів.

Потік вод спрямований від вододілу на захід до Новоселицької балки.

Там, де строкаті глини неогену розмиті, здійснюється перелив ґрунтових вод першого водоносного горизонту в продуктивний горизонт. Живлення полтавського водоносного горизонту здійснюється за рахунок перетікання ґрунтових вод через товщу глин.

Свердловини, які були використані в ході дослідження. На території ділянки було пробурено 5 свердловин різного призначення (св. №№ 1, 7, 8, 10, 11). Усі свердловини (крім св. № 10) з'єднані підземними трубопроводами і облаштовані так, що можуть працювати як у режимі відкачки, так і у режимі нагнітання. Схема розташування, конструкції свердловин та геологічний розтин за профілем АБ показано на рис. 2 і рис. 3. та в табл. 1.

Свердловину № 1 було пробурено з метою дослідження ефективності методів освоєння теплоти ґрунту, свердловину № 7 – як додаткову для отримання дебіту з бучакського водоносного горизонту, свердловина № 10 є спостережною, вона облаштована датчиками температури. Безпосередньо в роботі експериментальної установки задіяні як експлуатаційні – св. № 8 і № 11.

Свердловину № 8 було пробурено на відстані 11,5 м від свердловини № 1. Глибина свердловини – 49,5 м, а діаметр буріння – 215 мм. Свердловина по всій глибині закріплена обсадними трубами діаметром 125 мм, в інтервалі глибин 40,5–49,5 м встановлено поліпропіленовий фільтр такого ж діаметру. Нижня частина

свердловини обладнана відстійником завдовжки 0,5 м із заглушкою з ПВХ. У середині свердловини на водопідйомних трубах діаметром 32 мм на глибині 43 м встановлено електроzanурювальний насос марки Водолій 80. Продуктивний водоносний горизонт відкладень межигірської, берекської та новопетрівської світ олігоцен-міоцену у свердловині № 8 розташований на глибині 32–50 м. Водовмісні породи представлені піском тонко- та дрібнозернистим світло сірим. Статичний рівень у ході буріння був встановлений на глибині 32,0 м, а температура підземних вод становила 10° С.

Для вивчення природного режиму полтавського водоносного горизонту у св. № 1 і № 10 з лютого 2020 р. дотепер проводяться спостережні виміри температури підземних вод і рівня у водоносному горизонті. Результати спостережень наведено на рис. 4.

Як видно з рис. 4, у полтавському горизонті відбувається поступове зниження рівня води. За період спостережень рівень упав майже на 1 м. Також фіксуються внутрішньорічні зміни рівнів у горизонті, причому в літньо-осінній період спостерігається часткове відновлення рівня, тоді як в осінньо-зимовий період відбувається його зниження. Температура підземних вод знизилась за період спостережень на 0,3° С.

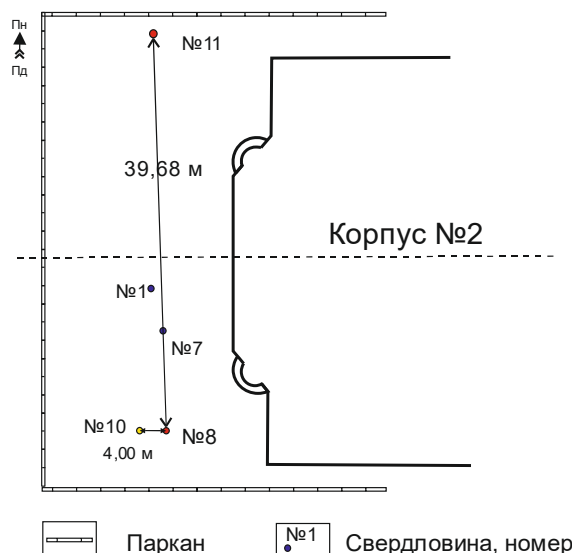


Рис. 2. Схема розташування свердловин на ділянці експериментальної гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу

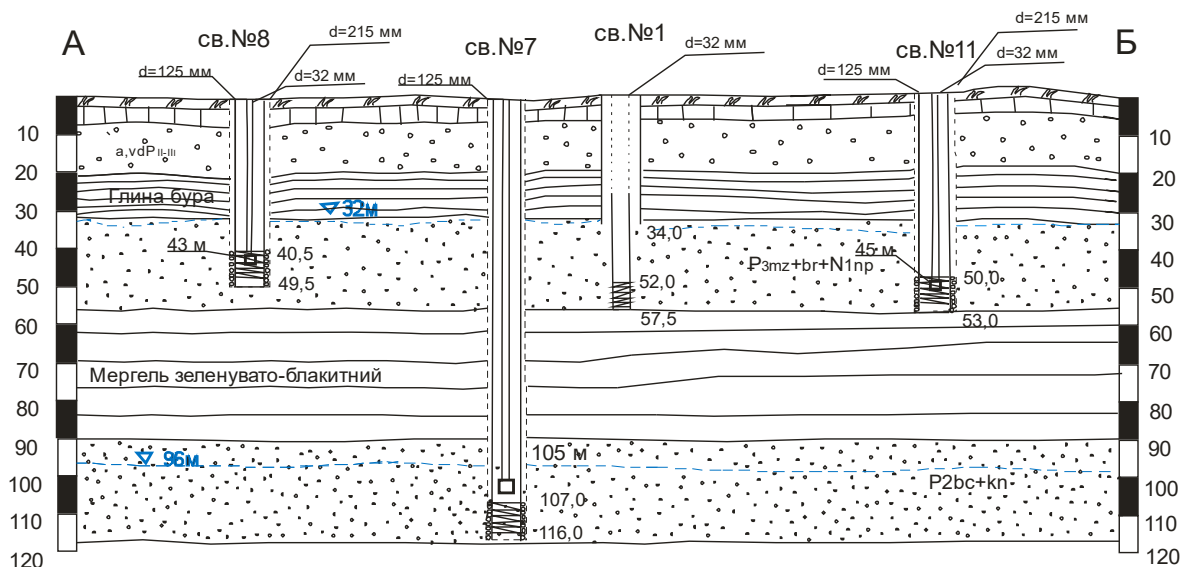


Рис. 3. Геолого-гідрогеологічний розтин експериментальної ділянки уздовж профілю АБ та технічні характеристики свердловин

Таблиця 1

Дані щодо свердловин, у яких проводились режимні спостереження

№ св.	Глибина, м	Конструкція				Інтервал встановлення фільтру, м	Продуктивний горизонт	Глибина установки насоса, м	Призначення свердловини
		I колона		II колона					
		Інтервал, м	Діаметр, мм	Інтервал, м	Діаметр, мм				
1	57	0-36	120	23-51,5	50	51,5-57	полтавський	немає	спостережна
7	117	0-108	125	-	-	108-117	бучакський	102	видобувна, нагнітальна
8	50	0-40,5	125	-	-	40,5-49,5	полтавський	43	видобувна, нагнітальна
10	54	0-50	125	-	-	50-53	полтавський	немає	спостережна
11	54	0-50	125	-	-	-	полтавський	45	видобувна, нагнітальна

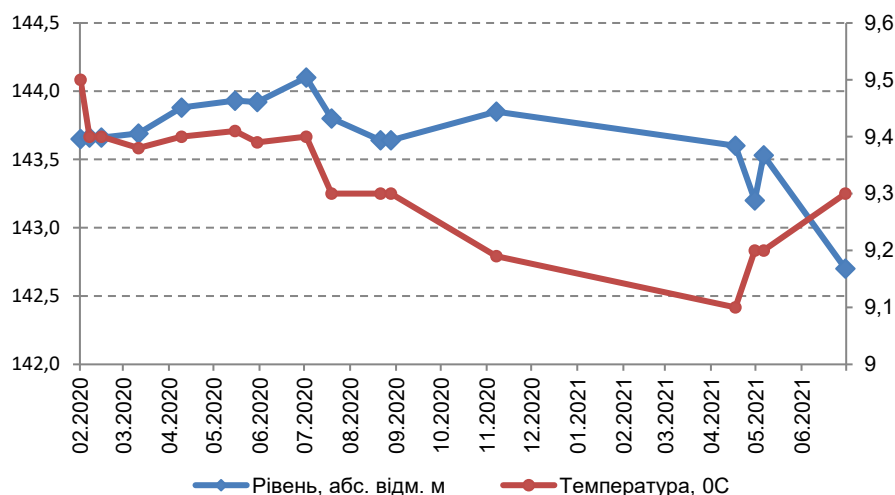


Рис. 4. Графік коливань рівня та температури підземних вод полтавського водоносного горизонту у свердловині № 1

Для визначення водозбагаченості полтавського горизонту у св. № 8 і № 11 було проведено пробне відкачування. Під час відкачування зі св. № 8 при зниженні рівня на 6 м дебіт становив 2–3 л/с, у св. № 11 при аналогічному дебіті зниження становило близько 5 м.

Хімічний аналіз проб води, яку було отримано під час відкачки зі св. № 8, показав, що води полтавського горизонту прісні, нейтральні (водневий показник дорівнює 6,98), жорсткі (загальна жорсткість – 12,65 ммоль/дм³) із загальною мінералізацією 635,6 мг/дм³. Деякі показники зразків не відповідають допустимим нормам для питних вод. Спостерігається незначне перевищення кількості загального заліза (0,23 ммоль/дм³) та кальцію (165,32 мг/дм³). У процесі експерименту передбачається вести спостереження за змінами хімічного і бактеріологічного складу підземних вод полтавського, а також нижчезташованого бучацького водоносних горизонтів.

Для визначення ефективності роботи гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу порівняно з аналогічною геотермальною теплонасосною системою закритого типу, як аналог було використано експериментальну гідротермальну енергетичну теплонасосну систему закритого типу, спроектовану та змонтовану в Українському державному геологорозвідувальному інституті (УкрДГРІ). Обидві системи мають тепловий насос однакової потужності.

Колектор гідротермальної теплонасосної енергетичної системи закритого типу (рис. 5) являє собою два функціонально пов'язаних гідротермальних зонда, кожен з яких складається з двох пластикових труб, покладених кільцями з двох сторін металевої решітки. Вся конструкція гідротермального колектора встановлюється на дно водойми.

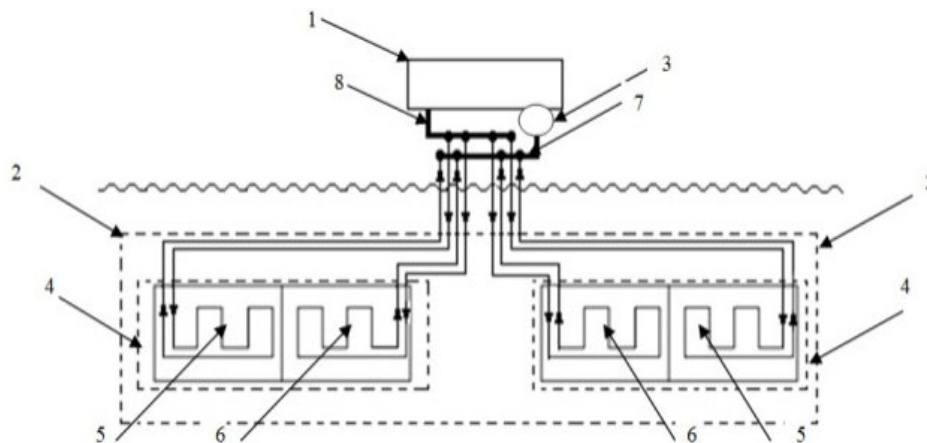


Рис. 5. Загальна схема гідротермальної енергетичної теплонасосної системи закритого типу:

- 1 – тепловий насос; 2 – колектор гідротермальної теплонасосної енергетичної системи; 3 – циркуляційний насос;
4 – гідротермальний зонд; 5, 6 – нижня і, відповідно, верхня труба гідротермального зонду; 7 – гребінка подачі теплоносія;
8 – гребінка повернення теплоносія (Гошовський та Зур'ян, 2014)

Як і попередня, ця система працює у двох режимах: теплозабезпечення та кондиціювання.

У режимі теплозабезпечення теплоносії (розчин пропіленгліколю), що циркулює по контуру колектор-тепловий насос, потрапляє з колектора гідротермальної теплонасосної системи, зануреного на дно водойми, до конденсатора теплового насосу з температурою,

відповідною температурі води у водоймі. Віддає частину свого теплового потенціалу (2–3° C), після чого знову потрапляє у колектор, занурений на дно водойми, де відновлює свій тепловий потенціал. У конденсаторі фреон, що циркулює по замкнутому внутрішньому контуру, за рахунок низькопотенціальної теплоти підземних вод випарюється та стискається компресорами теплового

насосу. Після стискання фреон з температурою 60–120° С потрапляє в конденсатор, де передає своє тепло в систему опалення будівлі через систему фанкойлів. Після чого цикл повторюється.

У режимі кондиціювання теплоносій (розчин пропіленгліколю), що циркулює по контуру колектор-тепловий насос, потрапляє з колектора гідротермальної теплонасосної системи, зануреного на дно водойми, і, минаючи конденсатор теплового насосу, подається безпосередньо на фанкойли, де забирає надлишкову теплову енергію з приміщення, та з температурою, вищою на 2–3° С знову потрапляє у колектор, занурений на дно водойми, де відновлює свій тепловий потенціал. Після чого цикл повторюється.

Наземна частина обох систем має однакові конструкції, і в них застосовуються теплові насоси однакової потужності. Гідротермальна теплонасосна система відкритого типу відрізняється від гідротермальної теплонасосної системи закритого типу тільки конструкцією колектора. У першому випадку – це водоносний горизонт, а у другому – зонд, занурений на дно водойми. Наземна частина експериментальних енергетичних систем складається з акумулятора теплової енергії та елементів теплового насоса із системою автоматики.

Отримана первинна теплова енергія приповерхневих шарів води перекачується тепловим насосом у систему теплозабезпечення будівлі з температурою, необхідною для комфортних умов проживання людей і роботи техніки.

З метою проведення досліджень до складу комплексу включено вимірювальне обладнання і автоматизовану систему управління. Вимірювальні прилади, а саме – датчики температури і датчики витрат теплоносія, встановлені як у наземній, так і підземній частинах комплексу.

Для вимірювань температури в контрольних точках використовувалися температурні датчики (термоперетворювачі опору) ТСП-204, які внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки України, за номером У246-07. Робочий діапазон вимірюваних температур від -40 до +270° С, показник теплової інерції не більше 6–8 сек.

В обох системах встановлено датчики витрати теплоносія на кожній лінії подачі теплоносія як у

гідротермальні зонди, так і у свердловини, та, так само, по два датчики на загальних магістралях потоку теплоносія по низькотемпературному і високотемпературному контурах наземної частини обох систем.

Датчики температури, встановлені у свердловину гідротермальної теплонасосної енергетичної системи відкритого типу, дозволяють вимірювати температуру повітря в затрубному просторі свердловини на глибині 1 м, 2 м, 5 м, 10 м, 20 м, 30 м, 40 м і температуру води у свердловині на глибині 45 м.

Датчики температури, встановлені в підводній частині гідротермальної теплонасосної енергетичної системи закритого типу, дозволяють вимірювати температуру води у водоймі і температуру теплоносія на вході і виході з кожного зонда колектора системи, встановленої на дні водойми з глибиною 3 м.

Для прийому і перетворення сигналів, що надходять від термоперетворювачів опору ТСП-204, у значення температури, і відображення їх на вбудованому цифровому індикаторі, застосовувався вимірювач восьмиканальний з блоком розширення аналогових входів І8 8ТC/10-RS485-БП-12-ІПК-Щ. З метою візуалізації даних, отриманих з датчиків, у режимі реального часу, запису їх в архів та відображення отриманих даних у вигляді таблиць або графіків, використовувався індикатор логер І16П RS 485/43-USBGSM-ІПР-Д і програмне забезпечення (система збору даних) PerMik.

Для виконання порівняльного аналізу теплонасосних енергетичних систем було прийнято критерії, в яких враховано як фізичні параметри, так і техніко-економічні показники теплових насосів (ТН) (Олійніченко та Марченко, 2017).

1. Теплова продуктивність (англ. Coefficient of Performance, COP).

2. Коефіцієнт перетворення теплової енергії.

3. Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса.

4. Питома вартість на 1 кВт виробленої теплоти.

Експеримент проводився протягом опалювального сезону. У ході проведення експерименту попередньо задані параметри контуру конденсатора відповідно до методики проведення експерименту не змінювалися (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри контуру конденсатора теплового насосу гідротермальних теплонасосних систем відкритого та закритого типу в період проведення дослідження

Система	Витрати теплоносія м³/год	Температура на вході в конденсатор теплового насосу	Температура на виході з конденсатора теплового насосу	Температура подачі теплоносія в систему т/з будівлі	Потужність системи (кВт)
Гідротермальна теплонасосна система відкритого типу	3,2	41–50	45–55	50	14,2
Гідротермальна теплонасосна система закритого типу	3,2	41–50	45–55	50	14,2

Температура теплоносія на вході у випарник безпосередньо залежить від параметрів відновлюваного джерела.

Тепловий режим води у водоймі визначається кількома процесами, які відбуваються одночасно, такими як: сонячна радіація, випаровування, теплообмін з атмосферою, перенос тепла течіями, турбулентним перемішуванням вод та ін. Зазвичай прогрівання води відбувається зверху вниз.

Тепловий режим води у водоносному горизонті залежить від геотермальних особливостей району. Він відображає вікові, тектонічні, літологічні і гідродинамічні особливості водоносних горизонтів та є результатом

декількох природних та техногенних факторів, що впливають одночасно, таких, як сонячна радіація, випаровування, теплообмін з ґрунтом, перенос тепла, турбулентне перемішуванням вод, умови залягання водоносного горизонту, живлення і дренажу, а також клімат, біосферний та антропогенний вплив та ін.

У процесі проведення дослідження на обох енергетичних установках було отримано дані річних змін температур у водоймі і у свердловині на різних глибинах, а так само температури на вході і виході з випарника і конденсатора.

Експериментально встановлено, що для гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу із забором

води із свердловини температура води на глибині 50 м є досить стабільною у часі та становить у середньому 10°C . Під час дослідження було встановлено незначні сезонні коливання температури води ($0,5\text{--}2^{\circ}\text{C}$) на виході зі свердловини. Теоретично обґрунтовано, що такі коливання температури води (теплоносія) можливі за рахунок теплообміну між стінками труби, по якій підіймається вода, та ґрунтом вище границі промерзання ($1\text{--}2\text{ м}$).

Експериментально встановлено, що для гідротермальної теплонасосної системи закритого типу з теплообмінником установленим у водойму завглибшки 2,5 м, температура теплоносія на вході в конденсатор теплового насоса коливається в діапазоні від $2\text{--}5^{\circ}\text{C}$ у січні-лютому, у листопаді-квітні становить $10\text{--}14^{\circ}\text{C}$, а у червні-серпні, за температури води у водоймі $24\text{--}27^{\circ}\text{C}$, температура теплоносія на вході у випарник не підіймається вище 20°C .

На основі експериментально отриманих даних витрат теплоносія по контуру конденсатора і значень температур на вході і виході з конденсатора теплового насоса, розраховано значення теплової продуктивності всієї енергетичної системи в цілому, яка склала 14 кВт по теплу для кожної з систем.

Були розраховані коефіцієнти трансформації для кожної з енергетичних систем для трьох зимових місяців року. Крім того, для порівняння обох гідротермальних систем із геотермальною теплонасосною системою закритого типу, де як система забору первинної теплової енергії використовуються вертикальні теплообмінники, встановлені у свердловини, були використані дані,

отримані під час попередніх досліджень (Гошовський та Зур'ян, 2014).

Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса по контуру конденсатора визначається системою опалення будівлі. Ефективність системи обернено пропорційна температурі теплоносія на виході з конденсатора ТН. При проведенні експерименту в обох системах температура на виході конденсатора встановлювалася однаковою і становила $45\text{--}55^{\circ}\text{C}$.

Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса по контуру випарника визначається джерелом низькопотенційної енергії і встановлюється на підставі аналітичних розрахунків залежно від середньої температури теплоносія на вході у випарник. Для гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу та геотермальної теплонасосної системи закритого типу – $8\text{--}13^{\circ}\text{C}$, а для гідротермальної теплонасосної системи закритого типу – $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$.

Питома вартість системи на 1 кВт виробленої теплової енергії визначається вартістю монтажу колектора для збору низькотемпературної теплової енергії. Для гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу вартість монтажу в цінах 2021 р. становить 50–70 тис. грн, для геотермальної теплонасосної системи закритого типу – 100–140 тис. грн, а для гідротермальної теплонасосної системи закритого типу – 10–20 тис. грн. З урахуванням вартості теплового насоса, що сягає за цінами 2021 р. 210 тис. грн, відповідно вартість системи на 1 кВт виробленої теплової енергії буде становити в середньому 19,3, 23,4 та 16 тис. грн. Отримані дані представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Підсумки аналізу теплонасосних енергетичних систем за критеріями, в яких враховані фізичні параметри та техніко-економічні показники

Система	COP	P (кВт)	Термін експлуатації (рік)	Питома вартість на 1 кВт (грн.)	Діапазон температур ефективної роботи теплонасосної системи
Гідротермальна система відкритого типу	4,5	14,2	30	19 300	8–13
Геотермальна система закритого типу	4,5	14,2	30	23 500	8–13
Гідротермальна система закритого типу	3,8	14,2	30	16 000	5–10

За підсумками виконаних розрахунків гідротермальна теплонасосна система відкритого типу, де як теплоносієм використовуються підземні води верхнього водоносного горизонту, має найкращу інвестиційну привабливість порівняно з іншими аналогічними системами, враховуючи привабливі економічні та технічні показники.

Разом з тим необхідно враховувати, що повернення відпрацьованого природного теплоносія назад у продуктивний водоносний горизонт змінює його природний тепловий і гідродинамічний режим і може спричинити негативний вплив на його стан.

Підземна вода, яка використовується в експериментальній установці, перебуває в замкнутому контурі, що виключає потрапляння забруднюючих речовин і контакту з повітрям, тому вважається, що вплив на продуктивний горизонт буде незначним. Крім того, технологічно в горизонт закачується по чергову то охолоджена, то нагріта вода. На цьому етапі закінчуються монтажні та підготовчі роботи для проведення дослідно-експлуатаційних випробувань експериментальної гідротермальної установки. Тому оцінка екологічного впливу використання водоносних горизонтів з енергетичною метою за допомогою теплових насосів – це завдання подальших досліджень.

Висновки.

1. Аналітично обґрунтовано і експериментально підтверджено, що незаперечною перевагою гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу, де як теплоносієм використовуються підземні води, є стабільна робота протягом року за рахунок малої девіації температури теплоносія на вході у випарник теплового насоса, крім того, така гідротермальна теплонасосна енергетична система вимагає відносно невеликих початкових інвестицій і при цьому має найбільший коефіцієнт перетворення теплової енергії (коефіцієнт трансформації) у зимовий період – 4,5. Аналогічні за потужністю і конструкцією енергетичні гідротермальні системи мають коефіцієнт трансформації в зимовий період у середньому 3,8.

2. Обґрунтовано, що для ефективного використання водоносного горизонту як природного акумулятора теплової енергії необхідно якісне попереднє вивчення геоморфологічних, геологічних та гідрогеологічних умов ділянки проведення бурових робіт та виконання попередніх гідрогеологічних досліджень.

3. Визначено, що при використанні водоносного горизонту як акумулятора теплової енергії для роботи гідротермальних систем відкритого типу необхідно

унеможливити контакт підземних вод із зовнішнім повітрям та забезпечити системне проведення моніторингу стану підземних вод із свердловини, що використовується для роботи теплового насосу.

4. Мають перспективу подальші дослідження можливостей та ефективності використання водоносного горизонту як природного акумулятора теплоти для стабілізації генерування енергії від відновлюваних джерел незалежно від кліматичних умов і пори року.

Список використаних джерел

- Баріло, А.А. (2017). Перспективи использования геотермальных технологий на территории Чернобыльской зоны отчуждения. *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*, 4-6, 64-69.
- Боревский, Б.В., Самсонов, Б.Г., Язвин, Л.С. (1973) Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра.
- Гошовский, С.В., Зурьян, А.В. (2013). Анализ изменения температур в верхних слоях Земли при решении задач грунтового аккумулирования и извлечения теплоты геотермальными системами закрытого типа. *Перспективы использования альтернативных и возобновляемых источников энергии в Украине, 9-13 сентября 2013 г., Судак, АР Крым, Украина. Тезисы докл. УкрГГРИ*, 32-35.
- Гошовский, С.В., Зурьян, А.В. (2015). Анализ применения различных источников возобновляемой энергии для оптимальной работы теплонасосных систем. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*, 2, 9-20.
- Гошовський, С.В., Зур'ян, О.В. (2014). Екологічно безпечно використання гідроенергетичного потенціалу гідротермальними енергетичними системами. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(87), 67-74.
- Долинский, А.А., Драганов, Б.Х. (2008). Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий. *Промышленная теплотехника*, 30, 6, 71-83.
- Елистратов, С.Л. (2011). Комплексное исследование эффективности тепловых насосов. *Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14*. Новосибирск.
- Калнинь, И.М. (1996). Техника низких температур на службе энергетики. *Холодильное дело*, 1, 26-29.
- Кириченко, А.С. (2014). Повышение эффективности работы подземного теплового аккумулятора. *Научный журнал КубГАУ*, 103(09), 1-18.
- Кудря, С.О. (2004). Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Київ: НТУУ "КПІ" ВПІ "Політехніка".
- Кудря, С.О. (2020). Відновлювані джерела енергії. ІБЕ НАН України, Київ
- Лисак, О.В. (2020). Аналіз системи центрального теплопостачання за використання сезонного геотермального акумулювання в комбінації з системою виробництва та споживання водно. *Відновлювана енергетика*, 3, 70-88.
- Малкін, Е.С., Кулінко Є.О. (2014). Перспективи та аспекти застосування систем теплохолодпостачання, які використовують приповерхневі шари води в якості теплового аккумулятора. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 17, 63-69.
- Морозов, Ю.П., Баріло, А.А., Чалаєв, Д.М., Добровольський, М.П. (2019). Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і холодопостачання. *Відновлювана енергетика*, 2, 70-78.
- Морозов, Ю.П., Чалаєв, М.М., Величко, В.В. (2017). Децентрализованное теплоснабжение с помощью геотермальных тепловых насосов. *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*, 4-6, 70-79.
- Морозов, Ю.П., Чалаєв, Д.М., Олійніченко, В.Г., Величко, В.В. (2019). Експериментальне дослідження добового акумулювання холоду шляхом використання води підземних горизонтів м. Києва. *Відновлювана енергетика*, 3(58), 67-77. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).67-77)
- Накорчевский, К. И. (2010). Грунтовые аккумуляторы теплоты и модернизация коммунальной теплоэнергетики. Институт технической теплофизики.
- Олійніченко, В.Г., Марченко, Е.В. (2017). Сравнительный анализ типов технологического исполнения тепловых насосов. *Материалы ХVIII Международной научно – практической конференции: Возобновляемая энергетика и энергоэффективность в XXI столетии*, 27-29 сент. 2017 г., Киев, 604-609.
- Ситников, А.Б., Головаченко, Ю.Г., Ткаченко, К.Д. (2003). Гидрогеологическая станция "Феофания": многолетние исследования и результаты. Институт геологических наук НАН Украины, Киев.
- Федянин, В.Я., Карпов, М.К. (2006). Использование грунтовых теплообменников в системах теплоснабжения. *Ползуновский вестник*, 4, 98-103.
- Шубенко, В.О., Кухарець, С.М. (2014). Використання низькотемпературних джерел енергії та їх перетворювачів. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України. Київ: Центр учбової літератури, 240-261.
- Яценко, Л.В., (2017). Определение эффективности использования комбинированных энергосистем на основе возобновляемых источников энергии. *Техническая электродинамика*, 34-41.
- Deng, J., Wei, Q., He, S., Liang, M., Zhang, H. (2020). Simulation Analysis on the Heat Performance of Deep Borehole Heat Exchangers in Medium-Depth Geothermal Heat Pump Systems, *Energies*, 13(3), 754; <https://doi.org/10.3390/en13030754>
- Hepbasli, A., Kalinci, Y. (2009). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Renewable Energy Reviews*, 13, 1211-1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>

- Kim, S.-K., Lee, Y. (2020). Evaluation of Ground Temperature Changes by the Operation of the Geothermal Heat Pump System and Climate Change in Korea. *Water*, 12(10), 2931. <https://doi.org/10.3390/w12102931>
- Laloui, L., Nuth, M., Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile. *Anal. Meth. Geomech*, 30, 763-781.
- Lund, J.W., Aniko, N. (2021). Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, April - October 2021.
- Matos, C.R., Carneiro, J.F., Silva, P.P. (2019). Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. *Journal of Energy Storage*, 21, 241-258. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.023>
- Morrison, G., Anderson, T., Behnia, M. (2004). Seasonal performance rating of heat pump water heaters. *Solar Energy*, 76, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.007>
- Zurian, O.V. (2019). Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Renewable Energy Sources and Clean Tech, Varna, Bulgaria, 83-90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>

Reference

- Barilo, A.A. (2017). Prospects for the use of geothermal technologies in the Chernobyl Exclusion Zone. *International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology*, 4-6, 64-69. [in Ukrainian]
- Borevsky, B.V., Samsonov, B.G., Yazvin, L.S. (1973). Methods for determining the parameters of aquifers from pumping data, M.: Nedra. [in Russian]
- Deng, J., Wei, Q., He, S., Liang, M., Zhang, H. (2020). Simulation Analysis on the Heat Performance of Deep Borehole Heat Exchangers in Medium-Depth Geothermal Heat Pump Systems, *Energies*, 13(3), 754; <https://doi.org/10.3390/en13030754>
- Dolinsky, A.A., Draganov, B.Kh. (2008). Heat pumps in the heating system of buildings. *Industrial heating technology*, 30, 6, 71-83. [in Russian]
- Elistratov, S.L. (2011). Comprehensive study of the efficiency of heat pumps. *Extended abstract of Doctor's thesis (Tech.): 01.04.14*. Novosibirsk. [in Russian]
- Fedyanin, V.Ya., Karpov, M.K. (2006). The use of ground heat exchangers in heat supply systems. *Polzunovsky Bulletin*, 4, 98-103. [in Russian]
- Goshovsky, S.V., Zurian, O.V. (2014). Ecologically safe use of hydropower potential by hydrothermal energy systems. *Visnyk of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (87), 67-74. [in Ukrainian]
- Goshovskiy, S.V., Zurian, A.V. (2013). Analysis of temperature changes in the upper layers of the Earth when solving problems of ground accumulation and heat extraction by closed-type geothermal systems. *Prospects for the use of alternative and renewable energy sources in Ukraine, September 9-13, 2013, Sudak, AR Crimea, Ukraine. Abstracts of UkrGRI*, 32-35. [in Russian]
- Goshovskiy, S.V., Zurian, A.V. (2015). Analysis of the use of various renewable energy sources for the optimal operation of heat pump systems. *Zbirnik naukovikh prats UkrDGRI*, 2, 9-20. [in Russian]
- Hepbasli, A., Kalinci, Y. (2009). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Renewable Energy Reviews*, 13, 1211-1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>
- Kalnin, I.M. (1996). Low temperature technology at the service of energy. *Refrigeration*, 1, 26-29. [in Russian]
- Kim, S.-K., Lee, Y. (2020). Evaluation of Ground Temperature Changes by the Operation of the Geothermal Heat Pump System and Climate Change in Korea. *Water*, 12(10), 2931. <https://doi.org/10.3390/w12102931>
- Kirichenko, A.S. (2014). Improving work efficiency, underground heat accumulator. *Scientific Journal KubGAU*, 103 (09), 1-18. [in Russian]
- Kudria, S.O. (2004). Unconventional and renewable energy sources. Kyiv: NTUU "KPI" VPI "Polytechnic". [in Ukrainian]
- Kudria, S.O. (2020). Renewable energy sources. IRE NAS of Ukraine, Kyiv. [in Ukrainian]
- Laloui, L., Nuth, M., Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile. *Anal. Meth. Geomech*, 30, 763-781.
- Lisak, O.V. (2020). Analysis of the district heating system using seasonal geothermal storage in combination with the system of hydrogen production and consumption. *Renewable Energy*, 3, 70-88. [in Ukrainian]
- Lund, J.W., Aniko, N. (2021). Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, April - October 2021.
- Malkin, E.S., Kulinko, E.A. (2014). Prospects and aspects of the application of heat and cold supply systems that use the surface layers of water as a heat accumulator. *Ventilation, lighting and heat and gas supply*, 17, 63-69. [in Ukrainian]
- Matos, C.R., Carneiro, J.F., Silva, P.P. (2019). Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. *Journal of Energy Storage*, 21, 241-258. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.023>
- Morozov, Yu.P., Barilo, A.A., Chalaev, D.M., Dobrovolsky, M.P. (2019). Energy efficiency of using the first aquifers from the surface for heat and cold supply. *Renewable energy*, 2, 70-78. [in Russian]
- Morozov, Yu.P., Chalaev, D.M., Olyinichenko, V.G., Velichko, V.V. (2019). Experimental study of daily accumulation of cold by using water of

underground horizons of Kyiv. *Renewable Energy*, 3, 67-77. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).67-77/](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).67-77/) [in Ukrainian]

Morozov, Yu.P., Chalaev, M.M., Velichko, V.V. (2017). Decentralized heat supply with geothermal heat pumps. *International scientific journal Alternative energy and ecology*, 4-6, 70-79. [in Russian]

Morrison, G., Anderson, T., Behnia, M. (2004). Seasonal performance rating of heat pump water heaters. *Solar Energy*, 76, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.007>

Nakorchevsky, K.I. (2010). Soil heat accumulators and modernization of communal heat and power engineering. Institute of Technical Thermophysics. National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv. [in Russian]

Olynychenko, V.G., Marchenko, E.V. (2017). Comparative analysis of types of technological execution of heat pumps. *Proceedings of the XYIII International Scientific and Practical Conference: Renewable energy and energy efficiency in the XXI century*, September 27-29, 2017, Kyiv, 604-609. [in Ukrainian]

Shubenko, V.O., Kukharets, S.M. (2014). Use of low-temperature energy sources and their converters. *Prospects for the development of alternative energy in Polissya of Ukraine*. Kyiv: Center for Educational Literature, 240-261. [in Ukrainian]

Sitnikov, A.B., Golovchenko, Yu.G., Tkachenko, K.D. (2003). Hydrogeological station "Feofania": long-term research and results. Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev.

Yatsenko, L.V. (2017). Determination of the efficiency of using combined energy systems based on renewable energy sources. *Technical electrodynamics*, 34-41. [in Russian]

Zurian, O.V. (2019). Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. *XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Renewable Energy Sources and Clean Tech*, Varna, Bulgaria, 83-90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>

Надійшла до редколегії 03.10.21

O. Zurian, PhD (Techn.), Senior Researcher,
E-mail: alexey_zuryan@ukr.net;
A. Barilo, Senior Researcher,
E-mail: geotherm@ukr.net;
Institute of Renewable Energy of the NAS Ukraine,
20-a Hn. Khotkevycha Str., Kyiv, 02094, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF HYDROTHERMAL HEAT PUMP INSTALLATIONS OF CLOSED AND OPEN TYPES WITH DIFFERENT SOURCES OF LOW-POTENTIAL ENERGY

The article is devoted to a new direction of using the waters of the upper aquifers and open reservoirs for heat and cold supply of residential and public buildings and structures. The theoretical analysis of technologies of construction and features of use of natural accumulators of thermal energy in aquifers is carried out. The general schemes of construction of hydrothermal power systems of closed and open type are described. The hydrothermal experimental heat pump power system developed and constructed at the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine consisting of a heat pump and two wells with a depth of 49.5 m and 57.5 m, through which water is pumped or pumped from the aquifer, is presented. The geomorphological, geological and hydrogeological conditions of the study site are analyzed. The peculiarities of the formation of groundwater reserves of the productive horizon are described. Further directions of hydrogeological observations have been determined.

The efficiency of the hydrothermal heat pump energy system of the open type is scientifically substantiated. Research methods are described. The characteristics of the measuring equipment and the software which was used for archiving and visualization of the data received in the course of carrying out research work are resulted.

The results of experimental researches are presented. A comparative analysis of the efficiency and investment attractiveness of the hydrothermal system of open and closed type, where low-potential thermal energy of water is used as a renewable primary source of thermal energy for the operation of the heat pump was carried out.

It is established that the use of renewable low-potential ground energy for the operation of geothermal energy systems is widely used in environmentally safe and economically attractive energy systems. However, the use of hydropower potential in hydrothermal energy systems is not widely used, despite the high technical and economic performance. It is proved that the existing hydrothermal systems are not always adapted to the operating conditions and location of the facility. There is no method of designing open-type hydrothermal systems, methods of conducting preliminary hydrogeological studies of the area planned for the installation of these systems and methods of calculating the parameters of the storage medium.

The data obtained during the study are of great scientific and applied importance in the design of hydrothermal energy heat pump systems. In addition, there are prospects for further research into the possibility and effectiveness of using the aquifer as a natural heat accumulator to stabilize the generation of energy from renewable sources, regardless of climatic conditions and time of year.

Keywords: heat pump, hydrothermal system, aquifer, low-grade water energy.

A. Зур'ян, канд. техн. наук, науч. сотр.,
E-mail: alexey_zuryan@ukr.net;
А. Барыло, науч. сотр.,
E-mail: geotherm@ukr.net;
Институт возобновляемой энергетики НАН Украины,
Ул. Г. Хоткевича, 20-а, Киев, 02094, Украина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ЗАКРЫТОГО И ОТКРЫТОГО ТИПОВ С РАЗНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Посвящено новому направлению использования вод верхних водоносных горизонтов и открытых водоемов для тепло- и холодоснабжения жилых и общественных зданий и сооружений. Приведен теоретический анализ технологий построения и особенностей использования природных аккумуляторов тепловой энергии в водоносных горизонтах. Описаны общие схемы построения гидротермальных теплонасосных систем закрытого и открытого типа. Представлена разработанная и сконструированная в Институте возобновляемой энергетики НАН Украины гидротермальная теплонасосная система, состоящая из теплового насоса и двух скважин глубиной 49,5 м и 57,5 м. Проведен анализ геоморфологических, геологических и гидрогеологических условий участка исследования. Описаны особенности формирования запасов подземных вод продуктивного горизонта. Определены дальнейшие направления проведения гидрогеологических наблюдений.

Научно обоснована эффективность гидротермальной теплонасосной системы открытого типа. Описана методика проведения исследований. Приведены характеристики измерительного оборудования и программного обеспечения, которое использовалось для архивации и визуализации данных, полученных в процессе проведения научно-исследовательской работы.

Приведены результаты экспериментальных исследований. Проведен сравнительный анализ эффективности и инвестиционной привлекательности гидротермальных теплонасосных систем открытого и закрытого типов, где в качестве возобновляемого первичного источника тепловой энергии для работы теплового насоса используется низкопотенциальная тепловая энергия воды.

Установлено, что использование возобновляемой низкопотенциальной энергии грунта для работы геотермальных теплонасосных систем широко применяется в экологически безопасных и экономически привлекательных системах получения тепловой энергии. Вместе с тем использование гидроэнергетического потенциала в гидротермальных теплонасосных системах не имеет широкого применения, несмотря на высокие технические и экономические показатели. Доказано, что имеющиеся гидротермальные системы не всегда адаптированы к условиям эксплуатации и местоположения объекта. Отсутствуют методики проектирования гидротермальных теплонасосных систем открытого типа, методики проведения предварительных гидрогеологических исследований района, планирования для монтажа данных систем, и методики расчета параметров аккумулирующей среды.

Полученные в ходе исследования данные имеют важное научное и прикладное значение при проектировании гидротермальных теплонасосных систем. Кроме того, имеют перспективу дальнейшие исследования возможностей и эффективности использования водоносного горизонта в качестве естественного аккумулятора теплоты для стабилизации генерирования энергии от возобновляемых источников независимо от климатических условий и времени года.

Ключевые слова: тепловой насос, гидротермальная система, водоносный горизонт, низкопотенциальная энергия воды.

УДК 550.8.053:004.93*14

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.14>М. Попов, д-р техн. наук, проф., член-кор. НАН України,
E-mail: mpopov@casre.kiev.ua;М. Топольницький, д-р техн. наук,
E-mail: topolnytskyi.m@gmail.com;О. Титаренко, канд. техн. наук, пров. наук. співроб.,
E-mail: olgatitarenko@casre.kiev.ua;С. Станкевич, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: st@casre.kiev.ua;Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України,
вул. О. Гончара, 55-б, м. Київ, 01054, Україна

МЕТОД ФОРМУВАННЯ ПРОГНОЗНИХ ОЦІНОК НАФТОГАЗОНОСНОСТІ ДІЛЯНОК НАДР ШЛЯХОМ КОМБІНУВАННЯ ГЕОЛОГІЧНОЇ, НАЗЕМНОЇ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ТА СУПУТНИКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Б.П. Масловим)

Присвячено пошуку і розвідці покладів вуглеводнів, що є важливим і складним геологічним завданням, вирішення якого потребує великих обсягів первинних даних і значних інтелектуальних зусиль експертів-геологів. У зв'язку з цим актуальною є задача полегшити умови праці експертів і підвищити точність прогнозування нафтогазового потенціалу ділянок надр шляхом застосування сучасних цифрових методів інтегрування та інтерпретації гетерогенних даних.

Запропоновано новий метод формування прогнозних оцінок нафтогазоносності ділянок надр шляхом комбінування геологічної, наземної параметричної й супутникової інформації. Як математична основа методу використовується інструментарій теорії свідчень Демпстера–Шейфера, який дозволяє досить просто комбінувати дані з різних джерел, оперувати з неповними і неточними даними та ін. Велика частина процедур, що складають тіло методу, представлена у формі алгоритмів, що суттєво спрощує його технологізацію. Кінцевим інформаційним продуктом методу є карта з розподілом імовірнісних оцінок нафтогазоносності ділянок надр у межах заданої території дослідження. Розроблений метод реалізований програмно і пройшов тестування на території Східнокавказького нафтового родовища. Результати тестування свідчать про його досить високу ефективність.

Ключові слова: поклад вуглеводнів; геологічна, параметрична і супутникова інформація; інтегрування гетерогенних даних; нафтогазоносність ділянок надр; теорія свідчень Демпстера–Шейфера.

Вступ. Розвиток промисловості і сільського господарства неможливий без наявності потужної енергетичної бази. Тому економічно розвинені країни постійно приділяють увагу нагромадженню своїх енергетичних ресурсів, зокрема через геологічні роботи з виявлення нових родовищ вуглеводнів (Gaci et al., 2017).

Пошук родовищ вуглеводнів традиційно передбачає проведення комплексу геолого-геофізичних, геоморфологічних і геохімічних досліджень (Трофимов та ін., 2012). В останні два десятиліття до переліку пошукових робіт все частіше включаються аерокосмічні дослідження, перевагами яких є оперативність, здатність дистанційного обстеження важкодоступних територій, можливість охоплення великих площ (Трофимов та ін., 2012; Al Makki Mohamed et al., 2021; Лялько та ін., 2012).

У цілому такі дослідження, проведені з використанням сучасних методик і засобів, дають можливість здобути великі об'єми інформації щодо території досліджень, однак її інтерпретація геологом – це завжди складний когнітивний процес з елементами невизначеності. У зв'язку з цим актуальною є проблема створення Комп'ютерного асистента геолога (КомпАсГео), представлена в (Попов та ін., 2018). КомпАсГео, як передбачається, дозволить значно полегшити умови праці експертів-геологів і підвищити точність прогнозування нафтогазового потенціалу ділянок надр за рахунок використання сучасних цифрових методів інтегрування даних, інтерпретації інформації та прийняття рішень.

У статті розглянуто новий метод оцінювання нафтогазового потенціалу ділянок надр, який є модульною складовою методичного забезпечення КомпАсГео, що розробляється в Науковому центрі аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України. За методом, прогнозне оцінювання нафтогазоносності ділянок здійснюється шляхом комбінування гетерогенної (різномірної) інформації за допомогою

математичних засобів теорії свідчень Демпстера–Шейфера (ТСДШ). Процедура оцінювання враховує суб'єктивні уявлення експерта-геолога щодо пріоритетності тих чи інших доступних йому первинних даних.

Постановка завдання. Прогнозне оцінювання нафтогазоносності ділянок надр базується на залученні низки критеріїв, серед яких зустрічаються структурні, тектонічні, літологічні, геохімічні, геотермічні та ін. Процедура оцінювання ділянки організується зазвичай таким чином, що спочатку за кожним окремим критерієм формують ізольовані оцінки можливої нафтогазоносності ділянки, далі оцінки комбінуються і формується фінальна оцінка.

Необхідно зазначити, що на цьому шляху експерт-геолог стикається із серйозними труднощами. По-перше, більша частина критеріїв нафтогазоносності має вербальну форму, через що результати їх застосування можуть іноді трактуватись неоднозначно. По-друге, критерії мають відбиратись з урахуванням особливостей території досліджень. По-третє, внаслідок необхідності опрацювання експертом-геологом великих обсягів різномірної інформації зазвичай суттєвим є рівень когнітивних помилок.

У зв'язку з цим на допомогу експертам розробляються проблемно-орієнтовані комп'ютерні методи. Як математичну основу таких методів використовують баєсів аналіз (Porwal et al., 2008), суб'єктивну логіку (Popov et al., 2020), багатокомпонентний статистичний аналіз (Shaheen et al., 2011), ТСДШ (Yager and Liu, 2008). Проведений авторами цього дослідження аналіз показує, що найбільші можливості забезпечує інструментарій ТСДШ, оскільки він дозволяє достатньо просто комбінувати дані від різних джерел, працювати з неточними і неповними даними, оперувати на кількісному рівні з невизначеностями та ін.

Колективом голландських дослідників (Carranza et al., 2008) математичний інструментарій ТСДШ був використаний для виявлення генетичних асоціацій між

родовищами корисних копалин певного типу і просторовими геологічними атрибутами (літологія, щільність розломів, інтенсивність гідротермальних змін). Про ефективність інструментарію ТСДШ при картуванні площ на корисні копалини в умовах браку геологічних даних свідчать результати досліджень, наведених у (Carranza, 2015; Moon and Chung, 1991). У роботі (Попов та ін., 2015) запропоновано підхід до інтеграції геолого-геофізичних і супутникових даних на основі ТСДШ, який був реалізований у задачах виявлення позитивних на вуглеводні структур на ділянках прикерженського шельфу Чорного моря та в акваторії Азовського моря. У роботі (Попов та ін., 2017) засоби ТСДШ використані для інтеграції геолого-геофізичних і дистанційних даних при виявленні колекторів і покришок на території Липоводолинського нафтогазоконденсатного родовища.

Як вже було зазначено, при вирішенні завдання пошуку нафтогазоносних ділянок експерт-геолог намагається залучити всю доступну інформацію про територію дослідження і керується багатьма різними критеріями. Але доволі часто багатокритеріальний аналіз різних наборів даних призводить до протилежних висновків щодо нафтогазового потенціалу геологічних структур. У таких випадках виникає проблема досягнення консенсусу. Подібні ситуації можуть бути промодельовані і вирішені за допомогою математичних засобів ТСДШ.

У цій роботі вирішується завдання розроблення методу оцінювання нафтогазоносності ділянок надр шляхом комбінування гетерогенної (різнорідної) інформації на основі математичних засобів ТСДШ. При цьому метод дозволяє врахувати суб'єктивні уявлення експерта-геолога щодо відносної важливості (пріоритетності) наявних первинних даних.

Зупинимось на математичних основах розробленого методу.

Звід положень теорії свідчень Демпстера-Шейфера. Базове поняття в ТСДШ – "основа аналізу" (Frame of Discernment або FoD). Основа аналізу визначається як множина з N взаємно незалежних елементів, що разом складають вичерпну групу (тобто завжди принаймні один із цих елементів реалізується).

Залежно від предметної галузі прикладного застосування ТСДШ, як складові елементи FoD можуть розглядатися стани деякого досліджуваного процесу, відповіді на запитання, гіпотези щодо деякого об'єкта тощо.

У нашій роботі як елементи FoD будемо розглядати гіпотези і записувати множину FoD як

$$\theta = \{H_1, \dots, H_k, \dots, H_K\}, \quad (1)$$

де H_k – k -та гіпотеза.

З елементів множини (1) шляхом комбінування можна побудувати іншу, більш численну множину, яка вміщує в собі всі можливі гіпотези щодо стану об'єкта, всі їх об'єднання у формі диз'юнкцій по два, по три елементи і т. д., а також саму множину θ . Побудована таким чином множина має назву "показова множина" (Power Set) і позначається як 2^θ .

Показова множина нараховує у своєму складі 2^θ елементів:

$$2^\theta = \{\emptyset, H_1, \dots, H_k, \dots, H_K, H_1 \cup H_2, H_1 \cup H_3, \dots, H_1 \cup H_2 \cup H_3, \dots, \theta\}, \quad (2)$$

де $\emptyset$ – пуста множина.

З кожним окремим елементом A показової множини 2^θ пов'язують число $m(A)$, таке, що задовольняє умови:

$$\begin{cases} \sum_{A \in 2^\theta} m(A) = 1; \\ m(\emptyset) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Число $m(A)$ називається масою довіри (Belief Mass) елемента A . Елементи показової множини 2^θ з ненульовою масою довіри ($m(A) > 0$) називаються *фокальними*.

Сукупність мас довіри всіх елементів множини 2^θ утворює розподіл мас довіри (Basic Belief Assignment або BBA). На основі розподілу BBA обчислюються дві важливі функції: довіри і правдоподібності.

Функція довіри (Belief Function) має вигляд

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B). \quad (4)$$

Функція правдоподібності (Plausibility Function) має вигляд

$$Pl(A) = \sum_{B \cap A = \emptyset} m(B). \quad (5)$$

У ТСДШ існує таке правило. Положимо, є два взаємно незалежні розподіли BBA; позначимо їх як m_1 та m_2 . Ці два розподіли можна об'єднати в один, користуючись комбінаційною формулою Демпстера:

$$m_1 \oplus m_2 = \frac{1}{1 - K_D} \sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C), \quad (6)$$

де позначка $\oplus$ означає пряму суму;

$$K_D = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C), \quad B, C \in 2^\theta, \quad A \neq \emptyset. \quad (7)$$

Показник K_D має область значень $[0, 1]$, причому чим більше два розподіли BBA відрізняються між собою (конфліктують), тим ближче до 1 величина K_D . Тому показник K_D називається *ступенем конфліктності*.

Звернемо увагу на те, що комбінаційне правило Демпстера (6) має той недолік, що воно ігнорує інформацію, отриману при комбінуванні "жорстко" конфліктуючих свідчень ($B \cap C = \emptyset$), що, у свою чергу, може призводити до некоректних результатів комбінування.

У математичному інструментарію ТСДШ є ще одна важлива формула, яка дозволяє переходити від мас довіри розподілу BBA до ймовірностей. Ймовірність будь-якого елемента BBA можна обчислити за допомогою формули

$$BetP(A) = \sum_{\substack{A \in B \\ B \in 2^\theta}} \frac{1}{|B|} m(B), \quad (8)$$

де $|B|$ – кардинальне число множини B .

Величина, що обчислюється за формулою (8), має назву пігністичної ймовірності (Pignistic Probability) (Smets, 2005).

Метод. Метод, що пропонується, призначений для використання експертом при геологічному вивченні визначеної території, метою якого є виявити нафтогазоперспективні ділянки. Кінцевим інформаційним продуктом застосування методу є карта з розподілом ймовірнісних оцінок нафтогазоносності ділянок надр у межах заданої території дослідження.

Метод складається з десяти кроків.

Крок 1: Збір даних. Під час збирання даних на території дослідження слід, оскільки не існує сталого загальноприйнятої системи критеріїв нафтогазоносності, уважно проглядати всю доступну інформацію щодо її геологічних, геопросторових, фізико-хімічних та інших властивостей. Релевантна інформація міститься в сейсмічних профілях і структурних формах, спектрограмах, геологічних картах, матеріалах електро- і магніторозвідки тощо.

Одна з важливих умов – наявність аеро- або супутникового знімку (кількох знімків) території дослідження. Загальні вимоги до знімку такі: максимальна багатоспектральність (якомога більше зображень у різних

зонах електромагнітного спектра), просторова розрізненість – середня, наявність геоприв'язки.

Потрібні відомості отримують через геологічні фонди, у різноманітних базах геоданих і репозитаріях, національних і міжнародних архівах матеріалів аеро- та космічної зйомки, в електронних бібліотеках спектральних сигнатур природних об'єктів та утворень тощо. За наявності фізичного доступу до визначеної території зібрані набори даних та відомості можуть бути актуалізовані, поповнені або деталізовані шляхом проведення наземних вимірювально-спостережних робіт.

Приймаючи рішення про подальший розгляд тих чи інших зібраних даних або відомостей, необхідно приділити належну увагу таким показникам, як надійність джерел їх постачання (формування) та їхня якість.

Крок 2: Попередня обробка зібраних даних. Практично завжди дані, зібрані на задану територію, мають різне походження, формувались неоднаковими методами і вимірювались різними технічними засобами. Тому вони можуть відрізнитись між собою форматом подання (вектор, растр), періодичністю вимірювань у часі-просторі, застосованою системою координат геоприв'язки тощо. Окрім того, для частки ділянок первинні дані можуть бути недовизначеними, з "прогалинами".

Тому на кроці 2 здійснюються заходи щодо забезпечення інтероперабельності зібраних наборів даних, а саме:

1) всі наявні вхідні дані перетворюються у растровий формат;

2) всі вхідні дані приводяться до єдиної системи координат;

3) вісь набір кількісних (фізичних) даних масштабується таким чином, щоб значення з цього набору були визначені для кожної ділянки на території дослідження.

Крок 3: Формування тематичних шарів. Площа ділянки земної поверхні, яка ізолювано (незалежно від суміжних ділянок) оцінюється щодо її нафтогазового потенціалу, дорівнює проєкції на земну поверхню площі одного растрового елемента (піксельної комірки) залученого аеро- чи супутникового зображення території дослідження. Такий вибір розміру ділянки зумовлений, зокрема, тим, що дозволяє "прив'язувати" до піксельних комірок зібрані набори даних про геологічні, геофізичні, геохімічні та інші властивості (ознаки) ділянок надр.

Будемо далі вважати, що цифрове зображення має розмір $L \times M$ піксельних комірок. Розподіл по комірках значень якоїсь однієї фізичної ознаки будемо називати *тематичним шаром* і позначати як $u(i, j); i = 1, 2, \dots, L; j = 1, 2, \dots, M$. Як фізичні ознаки можуть розглядатись напруженість електричного поля, спектральна яскравість, температура тощо. Усього на кроці 3 формується K тематичних шарів (за числом зібраних на попередньому кроці і задіяних для подальшого розгляду фізичних ознак).

Крок 4: Формування ізолюваних суб'єктивних імовірностей нафтогазоносності ділянок. Багато дослідників відзначають існування причинно-наслідкових зв'язків між оптичними, геохімічними та іншими властивостями ділянки надр та її нафтогазовим потенціалом (див., наприклад, (Трофимов та ін., 2012; Al Makki Mohamed et al., 2021; Shaheen et al., 2011)). Цей факт дозволяє стверджувати, що, маючи реалізацію (значення) u деякого фізичного параметра u , вимірюваного в межах ділянки, можна надати, з певною ймовірністю, прогнозу оцінку її нафтогазоносності.

Нехай $\dot{u}_k(i, j)$ – відоме значення фізичного параметра в (i, j) -ій комірці K -го тематичного шару. Задача, яку

розв'язує експерт-геолог на кроці 4, полягає в тому, щоб на підставі значення $\dot{u}_k(i, j)$ оцінити епістемну (суб'єктивну) ймовірність нафтогазоносності $p_k(i, j)$ однойменної

ділянки, тобто побудувати перетворення: $\dot{u}_k \Rightarrow p_k = [0, 1]$. Така задача послідовно розв'язується

для всіх $L \times M$ ділянок визначеної території, спочатку за даними (значеннями фізичних параметрів) одного тематичного шару, потім за даними другого шару і т. д., аж до K -го шару включно.

У підсумку кожний тематичний шар доповнюється відповідним розподілом імовірностей нафтогазоносності $p_k(i, j)$

ділянок; $i = 1, 2, \dots, L; j = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K$. Це надає можливість охарактеризувати нафтогазоносність будь-якої (i, j) -ої ділянки сукупністю з K визначених експертом-геологом оцінок імовірностей:

$$\left(p_{1(i,j)}, \dots, p_{k(i,j)}, \dots, p_{K(i,j)} \right).$$

Крок 5: Формування розподілів ВВА тематичних шарів. Під час вивчення кожної ділянки розглядають дві гіпотези: H_1 – ділянка має позитивний вуглеводневий потенціал; H_2 – вуглеводневий потенціал у ділянки відсутній. Логічно вважати ділянку нафтогазоперспективною, якщо для неї оцінка ймовірності p лежить в області значень $R^+ = (0.5; 1.0]$. В інших випадках ($p \in R^- = [0; 0.5]$) ділянку вважають неперспективною.

Гіпотези H_1 та H_2 є взаємно незалежними і утворюють вичерпну групу, а тому, в термінології ТСДШ, вони разом становлять основу аналізу FoD:

$$\Theta = \{H_1, H_2\}. \quad (9)$$

Показова множина для основи аналізу (1) буде такою:

$$2^\Theta = \{\emptyset, H_1, H_2, H_3\}, \quad (10)$$

де $H_3 = H_1 \cup H_2$.

Але оскільки елемент $\emptyset$ за визначенням (2) не належить до фокальних елементів, то далі реальний інтерес в (10) мають тільки три гіпотези з відповідними масами довіри. Наприклад, для (i, j) -ої комірки k -го тематичного шару маємо

$$\left\{ \left\langle H_1, m_{1(i,j)} \right\rangle, \left\langle H_2, m_{2(i,j)} \right\rangle, \left\langle H_3, m_{3(i,j)} \right\rangle \right\}, \quad (11)$$

при цьому $\sum_{q=1}^3 m_{q(i,j)} = 1$.

$$\underbrace{m_{1(i,j)} \oplus \dots \oplus m_{k(i,j)} \oplus \dots \oplus m_{K(i,j)}}_{K-1}$$

Розподіл ВВА для будь-якої (i, j) -ої комірки k -го тематичного шару можна записати як вектор

$$m_k(i, j) = \left(m_{1(i,j)}, m_{2(i,j)}, m_{3(i,j)} \right), \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (12)$$

Всі три складові елементи вектора $m_k(i, j)$ є функцією

ймовірності нафтогазоносності $p_k(i, j)$. Визначити вид цієї

функції дозволяє метод, запропонований J. Sudano

(Sudano, 2002). Застосування методу приводить до такого результату:

$$m_{(i,j)}^k = \begin{cases} \left(2 \cdot p_{(i,j)}^k - 1; 0; 2 - 2 \cdot p_{(i,j)}^k \right) & \text{якщо } p_{(i,j)}^k \in R^+; \\ \left(0; 1 - 2 \cdot p_{(i,j)}^k; 2 \cdot p_{(i,j)}^k \right) & \text{якщо } p_{(i,j)}^k \in R^-. \end{cases} \quad (13)$$

Базуючись на (13), для кожної комірки (i, j) отримують свій комплект з K розподілів ВВА (за числом тематичних шарів):

$$\left(m_{(i,j)}^1, \dots, m_{(i,j)}^k, \dots, m_{(i,j)}^K \right), \quad i = 1, 2, \dots, L, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (14)$$

Далі ці розподіли необхідно об'єднати, але проблема в тому, що деякі розподіли ВВА можуть сильно відрізнятися (конфліктувати) між собою. Основною причиною неузгодженості між розподілами ВВА є суттєві розбіжності між оцінками ймовірності нафтогазового потенціалу, які отримано для однієї й тієї ж ділянки надр у двох різних тематичних шарах.

Як відзначалося вище, комбінування неузгоджених (конфліктних) розподілів ВВА за звичайним правилом Демпстера (6) може призводити до некоректних результатів. Враховуючи цей факт, виконують наступний крок.

Крок 6: Коригування взаємної неузгодженості розподілів ВВА. Для коригування взаємної неузгодженості розподілів ВВА для кожної окремої ділянки користуємось підходом, наведеним в (Zhang et al., 2012). Розглянемо порядок коригування згідно з цим підходом на прикладі розподілів ВВА (14).

1. Розраховуються всі взаємні відстані між розподілами ВВА від $m_{(i,j)}^1$ до $m_{(i,j)}^K$, при цьому відстань між розподілами $m_{(i,j)}^1$ і $m_{(i,j)}^2$ обчислюється за виразом

(Jousselme et al., 2001)

$$d\left(m_{(i,j)}^1, m_{(i,j)}^2\right) = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(m_{(i,j)}^1 - m_{(i,j)}^2\right) \cdot D\left(m_{(i,j)}^1 - m_{(i,j)}^2\right)^T}, \quad (15)$$

де T – позначка транспонування; D – матриця розмірами $2^K \times 2^K$, елементи якої формуються за правилом

$$D(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}, \quad A, B \in 2^\Theta \text{ і належать векторам } m_{(i,j)}^1$$

$$\text{і } m_{(i,j)}^2.$$

2. Для кожного розподілу ВВА $m_{(i,j)}^k$ обчислюється середня відстань

$$\bar{d}_{(i,j)}^k = \frac{1}{K-1} \sum_{q=1, q \neq k}^K d\left(m_{(i,j)}^k, m_{(i,j)}^q\right), \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (16)$$

3. Розраховується ступінь підтримки розподілу ВВА $m_{(i,j)}^k$ з боку інших розподілів ВВА за виразом

$$Sup_{m_{(i,j)}^k} = \frac{1}{\bar{d}_{(i,j)}^k}, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (17)$$

4. Розраховується вага підтримки кожного розподілу ВВА за формулою

$$\gamma_{(i,j)}^k = \frac{Sup_{m_{(i,j)}^k}}{\sum_{k=1}^K Sup_{m_{(i,j)}^k}}, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (18)$$

5. Обчислюється зважений осереднений розподіл ВВА за виразом

$$\bar{m}_{(i,j)}^k(A) = \sum_{k=1}^K m_{(i,j)}^k(A) \cdot \gamma_{(i,j)}^k, \quad A \in 2^\Theta. \quad (19)$$

Таким чином узгоджуються послідовно один з одним всі K розподіли ВВА кожної однойменної комірки тематичних шарів.

Підкреслюємо, що всі розрахунки для будь-якої комірки тематичних шарів проводять за одним й тим же правилом.

Крок 7: Коригування розподілів ВВА з урахуванням показника пріоритетності. До процедури формування оцінок нафтогазового потенціалу ділянок залучають дані всіх без винятку тематичних шарів, але необхідно розуміти, що вплив шарів на кінцевий результат є різним. Враховуючи цей факт, кожен тематичний шар може бути охарактеризований показником пріоритетності (Importance Factor), величину якого $\beta \in [0; 1]$ призначає експерт залежно від його суб'єктивних уявлень. При цьому величину $\beta = 1$ призначають тематичному шару, вплив якого на формування оцінки нафтогазового потенціалу найбільший, а величину $\beta = 0$ – шару з найменшим впливом.

Експерт призначає показник пріоритетності тематичним шарам за умови

$$\sum_{k=1}^K \beta_k = 1. \quad (20)$$

Після того як призначені показники пріоритетності для кожного k -го тематичного шару, розподіли ВВА мають бути відповідно скориговані. Це здійснюють шляхом дисконтування за формулою

$$\beta_k \odot \bar{m}_{(i,j)}^k(A) = m_{(i,j)}^\beta(A) = \begin{cases} \beta_k \cdot \bar{m}_{(i,j)}^k(A), & \text{якщо } A \in 2^\Theta; \\ 1 - \beta_k, & \text{якщо } A \in \Omega, \end{cases} \quad (21)$$

де $\odot$ – операція дисконтування.

Дисконтування за формулою (21) призводить до того, що кількість розглядуваних у кожній комірці гіпотез збільшується з трьох (див. вираз (11)) до чотирьох:

$$(H_1, H_2, H_3, H_\Omega), \quad (22)$$

де H_Ω – фокальна гіпотеза для множини Θ .

При цьому отримуємо замість маси довіри $m(\cdot)$ інше визначення маси m^β , яке діє на розширеній множині $(2^\Theta \cup \Omega) = 2^{\Theta+}$. Така маса повинна задовольняти умови

$$\begin{cases} \sum_{A \in 2^{\Theta+}} m^\beta(A) = \sum_{A \in 2^\Theta} m^\beta(A) + m^\beta(\Omega) = 1; \\ m^\beta(\emptyset) = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Сукупність мас довіри $\{m^\beta\}$ для всіх елементів множини $2^{\Theta+}$ складає скоригований з урахуванням пріоритетів розподіл мас довіри IBBA (Importance Basic Belief Assignment).

Після дисконтування отримуємо такі кориговані набори "гіпотеза+маса" по комірках кожного тематичного шару:

$$\begin{aligned} & \left\langle \left(H_1, m_{1,1}^{\beta_1} \right), \left(H_2, m_{2,1}^{\beta_1} \right), \left(H_3, m_{3,1}^{\beta_1} \right), \left(H_\Omega, m_{\Omega,1}^{\beta_1} \right) \right\rangle \\ & \vdots \\ & \left\langle \left(H_1, m_{1,k}^{\beta_k} \right), \left(H_2, m_{2,k}^{\beta_k} \right), \left(H_3, m_{3,k}^{\beta_k} \right), \left(H_\Omega, m_{\Omega,k}^{\beta_k} \right) \right\rangle | i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, M, \\ & \vdots \\ & \left\langle \left(H_1, m_{1,K}^{\beta_K} \right), \left(H_2, m_{2,K}^{\beta_K} \right), \left(H_3, m_{3,K}^{\beta_K} \right), \left(H_\Omega, m_{\Omega,K}^{\beta_K} \right) \right\rangle \end{aligned} \quad (24)$$

Наступний крок потрібний, щоб об'єднати (скомбінувати) маси однойменних гіпотез, які вони мають у різних шарах, і, отже, для кожної групи однойменних гіпотез одержати одну масу.

Крок 8: Комбінування мас довіри гіпотез. Комбінування мас для кожної гіпотези виконують послідовно. Спочатку комбінують маси гіпотези, сформовані в одній комірці за даними першого ($k=1$) і другого ($k=2$) інформаційних шарів. Далі одержаний результат комбінують з масою гіпотези, сформованій у тій же комірці за даними третього ($k=3$) інформаційного шару і т. д. Комбінування маси гіпотези завершується після виконання ($K-1$) таких операцій.

Для комбінування мас використовують правило Демпстера в адаптації Жіао (*Jiao et al., 2016*). Припустимо, є два тематичні шари, показник пріоритетності одного шару β_1 , а рівень пріоритетності іншого шару – β_2 . Скоригований з урахуванням пріоритетності шарів розподіл мас довіри (IBVA) у комірці (i, j) для першого тематичного шару становить $m_{1,1}^{\beta_1}(\cdot)$, а для другого тематичного

шару – $m_{2,2}^{\beta_2}(\cdot)$. Тоді ці два розподіли комбінуються за

правилом Демпстера–Жіао таким чином:

$$m_{1,1}^{\beta_1} \oplus m_{2,2}^{\beta_2} = m_{12}^{D-J}(A) = \frac{1}{1 - K_{D,J}} \sum_{\substack{B, C \in 2^{9+}, \\ B \cap C = A}} m_{1,1}^{\beta_1}(B) \cdot m_{2,2}^{\beta_2}(C), \quad (25)$$

$$\text{де } K_{D,J} = \sum_{\substack{B, C \in 2^{9+}, \\ B \cap C = \emptyset}} m_{1,1}^{\beta_1}(B) \cdot m_{2,2}^{\beta_2}(C), \quad A \in 2^{9+}, \quad A \neq \emptyset.$$

За правилом Демпстера–Жіао послідовно комбінуються всі K , скориговані з урахуванням пріоритетності розподіли мас довіри IBVA, і після ($K-1$) застосувань цього правила всі однойменні комірки тематичних шарів одержують один єдиний для них розподіл IBVA, яким визначаються маси гіпотез для кожної досліджуваної ділянки надр:

$$\left\langle \left(H_1, m_{1,1}^{D-J} \right), \left(H_2, m_{2,2}^{D-J} \right), \left(H_3, m_{3,3}^{D-J} \right), \left(H_\Omega, m_{\Omega,\Omega}^{D-J} \right) \right\rangle | i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, M. \quad (26)$$

Кожна пара у (26) відображає можливий варіант оцінки нафтогазового потенціалу ділянки. Залишається визначити ту гіпотезу, яка найбільш адекватно оцінює геологічну реальність. Однак для цього спочатку необхідно від розподілу IBVA (26) з його чотирма гіпотезами повернутись до розподілу BVA, в якому три гіпотези.

Крок 9: Трансформування IBVA у BVA. Трансформування IBVA у BVA здійснюється шляхом перерозподілу маси довіри, що штучно була відведена для множини Ω на кроці 7 між іншими гіпотезами пропорційно їх масам довіри:

$$\left. \begin{aligned} m_{(i,j)}(H_1) &= \frac{m_{1,1}^{D-J}}{1 - m_{\Omega,\Omega}^{D-J}} \\ m_{(i,j)}(H_2) &= \frac{m_{2,2}^{D-J}}{1 - m_{\Omega,\Omega}^{D-J}} \\ m_{(i,j)}(H_3) &= \frac{m_{3,3}^{D-J}}{1 - m_{\Omega,\Omega}^{D-J}} \end{aligned} \right\} | i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, M. \quad (27)$$

За формулами (27) розраховують розподіли BVA гіпотез для кожної з $L \times M$ піксельних комірок i , таким чином, для проєкційно зв'язаних з ними ділянок надр. Залишається перейти від мас гіпотез у розподілах BVA до ймовірностей цих гіпотез і обрати для кожної окремої ділянки надр найбільш імовірну гіпотезу щодо її нафтогазоносності. Тобто зробити вибір між гіпотезами H_1 та H_2 .

Крок 10: Формування прогностичних оцінок нафтогазоносності ділянок надр. При відомому розподілі мас (27) прогностичні оцінки ймовірностей гіпотез H_1 та H_2 розраховують за допомогою формули пігністичної ймовірності (8). Отже, маємо:

$$\text{BetP}_{(i,j)}(H_1) = m_{(i,j)}(H_1) + 0.5 \cdot m_{(i,j)}(H_3), \quad (28)$$

$$\text{BetP}_{(i,j)}(H_2) = m_{(i,j)}(H_2) + 0.5 \cdot m_{(i,j)}(H_3), \quad (29)$$

Прогнозна оцінка нафтогазоносності (ПОН) будь-якої (i, j) -ої ділянки надр формується за правилом

$$\text{ПОН}_{(i,j)} = \max \{ \text{BetP}_{(i,j)}(H_1), \text{BetP}_{(i,j)}(H_2) \}. \quad (30)$$

Сукупність одержаних у такий спосіб ($L \times M$) прогностичних ймовірнісних оцінок дозволяє побудувати карту нафтогазоносності ділянок надр у межах території дослідження, а також вирізнити найперспективніші ділянки.

Апробація методу. Тестування запропонованого методу комбінування геологічної, наземної параметричної і супутникової інформації проводилося на території Східнорогінцівського нафтового родовища. Родовище розташоване в Роменському районі Сумської області на відстані 15 км від м. Ромни, в північній припортовій зоні Дніпровсько-Донецької западини і входить до складу Велікобубнівської групи структур.

Підняття було закартовано в 1958 р. сейсмічними дослідженнями по відбиваючих та умовних горизонтах мезозойських утворень. На площі пробурено чотири пошукові і розвідувальні свердловини, якими розкрито розріз осадових порід від четвертинних до девонських.

По покрівлі горизонту В-26, у нижньовізейських відкладах, структура є брахіантиклінально північно-західного простягання, порушено скидом у західній частині. Розміри її в межах ізогіпси, що має довжину 3000 м, – 4,0х1,7 км

(рис. 1). У межах підняття встановлено промислові поклади нафти в горизонтах Vb-17, Vb-19, Vb-21, Vb-26 візейського ярусу нижнього карбону. Поклади нафти – пластові, склепінні, інколи тектонічно екрановані та літологічно обмежені.

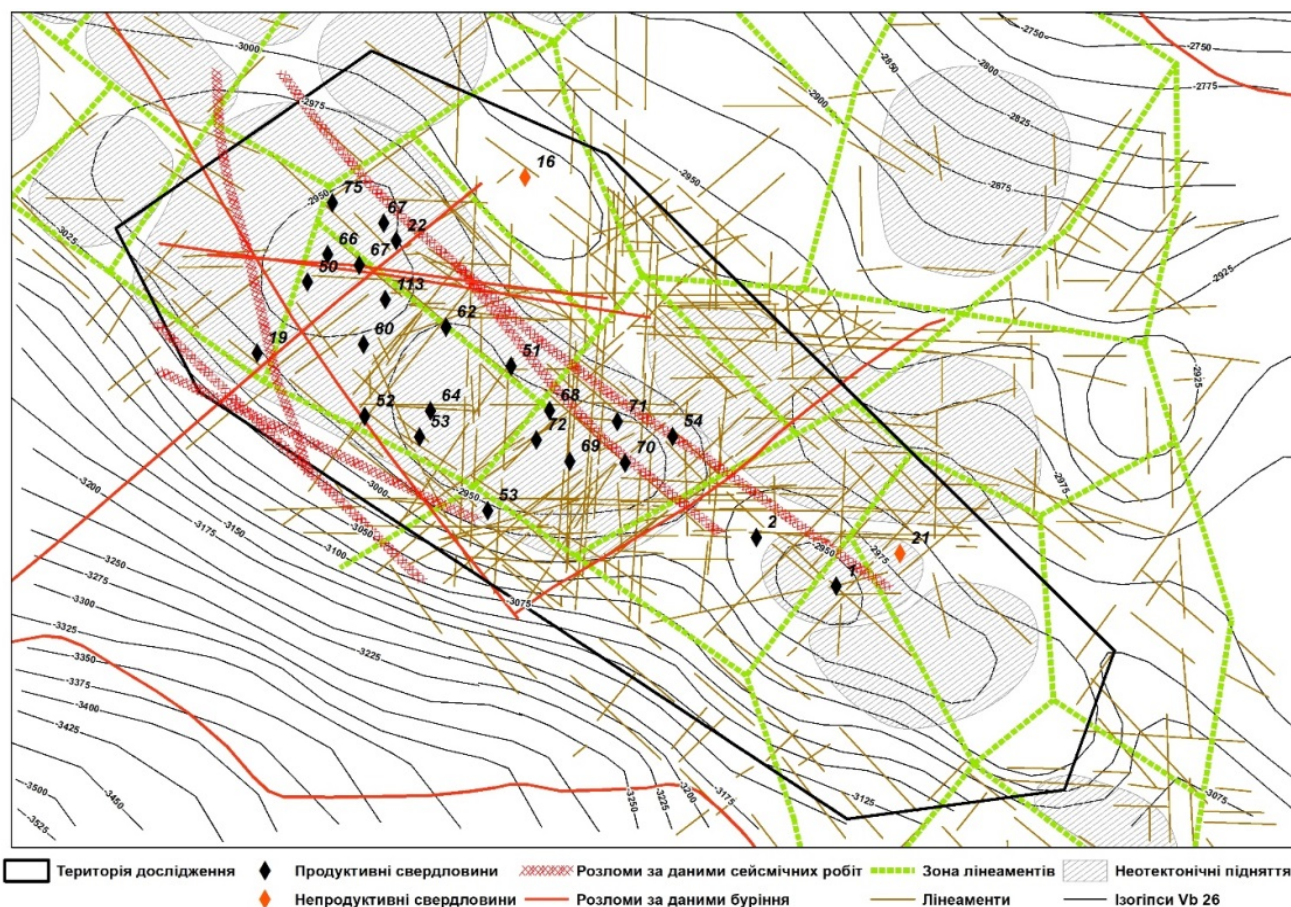


Рис. 1. Вхідні геолого-геофізичні та структурно-геоморфологічні дані на територію Східнорогінцівського родовища

Східнорогінцівська структура належить до типу надрозломних, глибокозанурених структур і є східним закінченням системи валоподібних підняттях, до яких належать Погрібська, Сологубівська, Матлахівська, Скороходівська та інші структури аналогічного походження.

Рельєф Східнорогінцівської структури являє собою густо розчленоване ярами та балками лівобережжя р. Ромен у межах неогенової новохарківської тераси.

Вхідними даними для досліджень на Східнорогінцівському родовищі є просторові шари, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Вхідні дані

№ з/п	Тематичний шар	Значення показника пріоритетності β
1	Структурна карта Vb 19	0,070
2	Структурна карта Vb 17	0,050
3	Структурна карта Vb 20	0,200
4	Структурна карта Vb 24	0,200
5	Карта базисної поверхні 2-го порядку	0,090
6	Карта базисної поверхні 3-го порядку	0,090
7	Карта базисної поверхні 4-5 порядків	0,090
8	Карта просторової щільності лінеаментів	0,075
9	Карта просторової щільності розломів	0,075
10	Карта вертикального розчленування рельєфу	0,040
11	Матеріали гравіметричної зйомки	0,020

Прогнозне оцінювання нафтогазоносності ділянок надр розробленим методом здійснювалось на основі наборів даних, які склали 11 тематичних шарів ($K=11$). Первинні дані формувались експертним шляхом; було залучено п'ять висококваліфікованих геологів, кожен з них працював незалежно і формував свої судження-

гіпотези з призначенням ним відповідних імовірностей. Розподіл прогнозних оцінок нафтогазоносності ділянок надр у межах території Східнорогінцівського родовища, одержаний шляхом комбінування геологічної і гравіметричної інформації на піксельній платформі супутникового знімку середнього просторового розрізнення,

закартований на рис. 2. На цю карту також нанесено інформацію про розроблені продуктивні і непродуктивні свердловини.

Побудована карта добре підтверджує блокову неоднорідність родовища, яка визначена проведеними на цій території багатьма геологічними дослідженнями. Також карта підтверджує існуюче розбиття території родовища на блоки, яке збігається з відомими структурно-геоморфологічними даними на території дослідження.

Аналіз карти показує, що непродуктивні свердловини № 16 та № 21 розташовані у відокремлених блоках з низьким нафтогазовим потенціалом, а всі 23 продуктивні свердловини розташовані на ділянках, які класифіковані розробленим методом як нафтогазоперспективні з імовірністю від 0,82.

Отримані авторами прогнози оцінки добре корелюють з даними структурно-геоморфологічних досліджень і оцінками, отриманими іншими дослідниками на території означеного родовища.

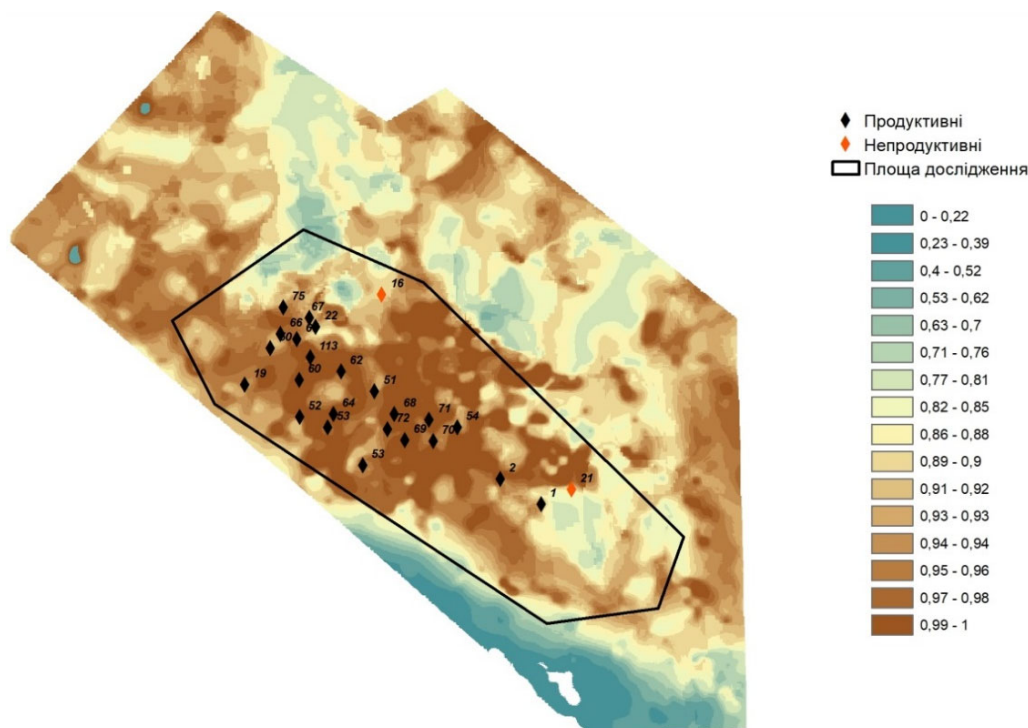


Рис. 2. Карта території Східнорогінцівського родовища з оцінками нафтогазоносності ділянок, одержаними за допомогою розробленого методу

Висновки. Пошук покладів вуглеводнів – одне з найбільш важливих і складних геологічних завдань, вирішення якого потребує великих обсягів первинних даних і значних інтелектуальних зусиль експертів-геологів. У зв'язку з цим актуальною є проблема полегшити умови праці експертів-геологів і підвищити точність прогнозування нафтогазового потенціалу ділянок надр за рахунок використання сучасних цифрових методів інтегрування даних, інтерпретації різномірної інформації та прийняття рішень.

У статті запропоновано новий метод формування прогнозних оцінок нафтогазоносності ділянок надр шляхом комбінування геологічної, наземної параметричної і супутникової інформації. Як математична основа методу використовується інструментарій ТСДШ, оскільки він дозволяє достатньо просто комбінувати дані від різних джерел, працювати з неповними і неточними даними, оперувати на кількісному рівні з невизначеностями та ін. Важливою особливістю методу є те, що в ньому передбачена можливість врахувати суб'єктивні уявлення експерта-геолога про відносну важливість (пріоритетність) тих чи інших наявних первинних даних.

Більшу частину процедур, які складають тіло методу, представлено у формі алгоритмів, що спрощує його технологізацію та подальшу імплементацію до складу різних експертних систем, орієнтованих на вирішення геологопошукових завдань, зокрема КомпАСГео, з метою полегшити умови праці експертів-геологів і

підвищити точність прогнозування нафтогазового потенціалу ділянок надр.

Кінцевим інформаційним продуктом застосування методу є карта з розподілом імовірнісних оцінок нафтогазоносності ділянок надр у межах заданої території дослідження. Розроблений метод був реалізований програмно і пройшов тестування на території Східнорогінцівського нафтового родовища. Результати тестування свідчать про його достатньо високу ефективність.

Свої майбутні дослідження автори пов'язують із подальшими удосконаленням алгоритмічного і програмного забезпечення розробленого методу, а також його технологізацією.

Список використаних джерел

- Лялько, В.И., Попов, М.А. (Ред.). (2012). Спутниковые методы поиска полезных ископаемых. К.: Карбон-Лтд.
- Попов, М.А., Станкевич, С.А., Архипов, А.И., Титаренко, О.В. (2018). О возможности дистанционного поиска залежей углеводородов с использованием компьютерного ассистента геолога. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 16, 34–40.
- Попов, М.О., Станкевич, С.А., Топольницький, М.В., Седлерова, О.В. (2015). Підхід до інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних на основі теорії свідчень Демпстера-Шейфера. *Доповіді НАН України*, 4, 94–98. DOI:10.15407/dopovidi2015.04.094
- Попов, М.О., Станкевич, С.А., Топольницький, М.В., Титаренко, О.В. (2017). Інтеграція дистанційних та геолого-геофізичних даних при пошуках покладів нафти та газу на суходолі. *Зб. наук. праць "Екологічна безпека та природокористування"*, К.: НАН України, МОН України, № 1-2 (23), 36–43.

Трофимов, Д.М., Евдокименков, В.Н., Шуваева, М.К. (2012). Современные методы и алгоритмы обработки и анализа комплекса космической, геолого-геофизической и геохимической информации для прогноза углеводородного потенциала неизученных участков недр. М.: ФИЗМАТЛИТ.

Al Makki Mohamed, M.T., Al Naimi, L.Sh., Mgbaojedo, T.I., Agoha, Ch.Ch. (2021). Geological mapping and mineral prospectivity using remote sensing and GIS in parts of Hamissana, Northeast Sudan. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 11, 1123–1138. DOI: 10.1007/s13202-021-01115-3

Carranza, E.J.M. (2015). Data-Driven Evidential Belief Modeling of Mineral Potential Using Few Prospects and Evidence with Missing Values. *Natural Resources Research*, 24, 3, 291–304. DOI: 10.1007/s11053-014-9250-z.

Carranza, E.J.M., van Ruitenbeek, F.J.A., Hecker, C., van der Meijde, M., van der Meer, F.D. (2008). Knowledge-guided data-driven evidential belief modeling of mineral prospectivity in Cabo de Gata, SE Spain. *Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, 374–387.

Dubucq, D., Ebner, A. (2019). Remote sensing onshore hydrocarbon direct detection for exploration: why is it different? *Proc. SPIE 11156, Earth Resources and Environmental Remote Sensing. GIS Applications X*, 111560P (3 October 2019). DOI: 10.1117/12.2533192

Gaci, S., Hachay, O. (Eds.). (2017). *Oil and Gas Exploration: Methods and Application*. Wiley. DOI: 10.1002/9781119227519

Jiao, L., Pan, Q., Liang, Y. et al. (2016). Combining sources of evidence with reliability and importance for decision making. *Central European Journal of Operations Research*, 24, 87–106. DOI: 10.1007/s10100-013-0334-3

Jousselm, A.L., Grenier, D., Bossé, É. (2001). A new distance between two bodies of evidence. *Information Fusion*, 2, 91–101. DOI: 10.1016/S1566-2535(01)00026-4

Moon, W.M., Chung, C.-I.F., An, P. (1991). Representation and Integration of Geological, Geophysical and Remote Sensing Data. *Geoinformatics*, 2, 2, 177–182.

Popov, M.O., Topolnitskyi, M.V., Titarenko, O.V., Stankevich, S.A., Andreiev, A.A. (2020). Forecasting Gas and Oil Potential of Subsoil Plots via Co-analysis of Satellite, Geological, Geophysical and Geochemical Information by Means of Subjective Logic. *WSEAS Transactions on Computer Research*, 8, 90–101. DOI: 10.37394/232018.2020.8.11

Porwal, A., Carranza, E.J.M. (2008). Classifiers for modelling of mineral potential. In: *Bayesian Networks: A Practical Guide to Applications*, O. Pourret, P. Naim, B. Marcot (Eds.). John Wiley & Sons, Chichester, 149–171.

Shaheen, M., Shahbaz, M., ur Rehman, Z. et al. (2011). Data mining applications in hydrocarbon exploration. *Artif. Intell. Rev.*, 35, 1–18. DOI: 10.1007/s10462-010-9180-z.

Smets, P. (2005). Decision Making in the TBM: the necessity of the pignistic transformation. *Int. Journal of Approximate Reasoning*, 38, 133–147.

Sudano, J.J. (2002). Inverse pignistic probability transforms. *Proceedings of the Fifth Int. Conf. on Information Fusion*, 2, 763–768.

Yager, R.R., Liu, L. (Eds.). (2008). *Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Zhang, H., Li, Y., Deng, Y. (2012). A New Method of Combining Conflict Evidences. *Journal of Computational Information Systems*, 8, 8, 3421–3427.

References

Al Makki Mohamed, M.T., Al Naimi, L.Sh., Mgbaojedo, T.I., Agoha, Ch.Ch. (2021). Geological mapping and mineral prospectivity using remote sensing and GIS in parts of Hamissana, Northeast Sudan. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 11, 1123–1138. DOI: 10.1007/s13202-021-01115-3

M. Popov, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Corresponding Member NAS of Ukraine, E-mail: mpopov@casre.kiev.ua;

M. Topolnitskyi, Dr. Sci. (Tech.), E-mail: topolnitskyi.m@gmail.com;

O. Titarenko, PhD (Tech.),

E-mail: olgatitarenko@casre.kiev.ua;

S. Stankevich, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,

E-mail: st@casre.kiev.ua;

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth NAS of Ukraine,

55-B, Oles Gonchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine

Carranza, E.J.M. (2015). Data-Driven Evidential Belief Modeling of Mineral Potential Using Few Prospects and Evidence with Missing Values. *Natural Resources Research*, 24, 3, 291–304. DOI: 10.1007/s11053-014-9250-z.

Carranza, E.J.M., van Ruitenbeek, F.J.A., Hecker, C., van der Meijde, M., van der Meer, F.D. (2008). Knowledge-guided data-driven evidential belief modeling of mineral prospectivity in Cabo de Gata, SE Spain. *Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, 374–387.

Dubucq, D., Ebner, A. (2019). Remote sensing onshore hydrocarbon direct detection for exploration: why is it different? *Proc. SPIE 11156, Earth Resources and Environmental Remote Sensing. GIS Applications X*, 111560P (3 October 2019). DOI: 10.1117/12.2533192

Gaci, S., Hachay, O. (Eds.). (2017). *Oil and Gas Exploration: Methods and Application*. Wiley. DOI: 10.1002/9781119227519

Jiao, L., Pan, Q., Liang, Y. et al. (2016). Combining sources of evidence with reliability and importance for decision making. *Central European Journal of Operations Research*, 24, 87–106. DOI: 10.1007/s10100-013-0334-3

Jousselm, A.L., Grenier, D., Bossé, É. (2001). A new distance between two bodies of evidence. *Information Fusion*, 2, 91–101. DOI: 10.1016/S1566-2535(01)00026-4

Lyalko, V.I., Popov, M.A. (Eds.). (2012). *Satellite methods for minerals prospecting / Kiev: Carbon-Ltd.* [in Russian]

Moon, W.M., Chung, C.-I.F., An, P. (1991). Representation and Integration of Geological, Geophysical and Remote Sensing Data. *Geoinformatics*, 2, 2, 177–182.

Popov, M.A., Stankevich, S.A., Arkhipov, A.I., Titarenko, O.V. (2018). About possibility of hydrocarbon deposit remote detection using computer assistance. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 16, 34–40. [in Russian]

Popov, M.O., Stankevich, S.A., Topolnitsky, M.V., Titarenko, O.V. (2017). Integration of remote and geological/geophysical data in oil and gas deposits onshore prospecting. *Environmental Security and Natural Resources*, 1-2 (23), 36–43. [in Ukrainian]

Popov, M.O., Stankevich, S.A., Topolnitsky, M.V., Sedlova, O.V. (2015). Approach to the integration of remote and geological/geophysical data based on the Dempster-Shafer theory of evidence. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 4, 94–98. DOI: 10.15407/Dopovid2015.04.094. [in Ukrainian]

Popov, M.O., Topolnitskyi, M.V., Titarenko, O.V., Stankevich, S.A., Andreiev, A.A. (2020). Forecasting Gas and Oil Potential of Subsoil Plots via Co-analysis of Satellite, Geological, Geophysical and Geochemical Information by Means of Subjective Logic. *WSEAS Transactions on Computer Research*, 8, 90–101. DOI: 10.37394/232018.2020.8.11

Porwal, A., Carranza, E.J.M. (2008). Classifiers for modelling of mineral potential. In: *Bayesian Networks: A Practical Guide to Applications*, O. Pourret, P. Naim, B. Marcot (Eds.). John Wiley & Sons, Chichester, 149–171.

Shaheen, M., Shahbaz, M., ur Rehman, Z. et al. (2011). Data mining applications in hydrocarbon exploration. *Artif. Intell. Rev.*, 35, 1–18. DOI: 10.1007/s10462-010-9180-z.

Smets, P. (2005). Decision Making in the TBM: the necessity of the pignistic transformation. *Int. Journal of Approximate Reasoning*, 38, 133–147.

Sudano, J.J. (2002). Inverse pignistic probability transforms. *Proceedings of the Fifth Int. Conf. on Information Fusion*, 2, 763–768.

Yager, R.R., Liu, L. (Eds.). (2008). *Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Zhang, H., Li, Y., Deng, Y. (2012). A New Method of Combining Conflict Evidences. *Journal of Computational Information Systems*, 8, 8, 3421–3427.

Надійшла до редколегії 03.09.21

METHOD FOR OIL AND GAS ESTIMATES OF EXPLORATION SITES VIA GEOLOGICAL, PARAMETRIC AND SATELLITE INFORMATION

The article is devoted to the search and exploration of hydrocarbons deposits, which is a crucial and complicated geological task and requires the large bulk of initial data and significant intellectual efforts of geologists. In this regard, the urgent problem is to ease the working conditions of experts and improve the accuracy of forecasting the oil and gas potential of subsoil areas through the use of novel digital methods of heterogeneous data integration and interpretation. The paper proposes a new method to form predictive estimates of the oil and gas content of subsoil areas via combining geological, ground-based parametric, and satellite information. As the mathematical basis of the method, the means of Dempster-Shafer's theory of evidence are used, which makes it possible to combine data from different sources, proceed with incomplete and inaccurate data, etc. Most of the procedures that make up the body of the method are presented in the form of algorithms, which simplifies its technologization. The final information product of the proposed method is a map with the distribution of probabilistic estimates of oil and gas prospects of subsoil areas within a given study area. The developed method is implemented in software and tested at the Vostochno-Rogintsovskoye oil field. The test results indicated its fairly high efficiency.

Keywords: hydrocarbon deposit; geological, parametric and satellite information; integration of heterogeneous data; oil and gas content of subsoil areas; theory of evidence of Dempster-Schafer.

М. Попов, д-р техн. наук, проф., член-корр. НАН України,

E-mail: mpopov@casre.kiev.ua;

М. Топольницький, д-р техн. наук,

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

О. Титаренко, канд. техн. наук, вед. научн. сотр.,

E-mail: olgatitarenko@casre.kiev.ua;

С. Станкевич, д-р техн. наук, проф.,

E-mail: st@casre.kiev.ua;

ГУ "Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины",

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

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГНОЗНЫХ ОЦЕНОК НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ УЧАСТКОВ НЕДР ПУТЕМ КОМБИНИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ, НАЗЕМНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ И СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Посвящено поиску залежей углеводородов, что является важной и сложной геологической задачей, решение которой требует больших объемов первичных данных и значительных интеллектуальных усилий экспертов-геологов. В связи с этим является актуальной задача облегчить условия труда экспертов и повысить точность прогнозирования нефтегазового потенциала изучаемых участков недр за счет использования современных цифровых методов интегрирования и интерпретации гетерогенных данных.

Предложен новый метод формирования прогнозных оценок нефтегазоносности участков недр путем комбинирования геологической, наземной параметрической и спутниковой информации. В качестве математической основы метода используется инструмент теории свидетельств Демпстера–Шейфера, который позволяет достаточно просто комбинировать данные из разных источников, оперировать с неполными и неточными данными и др. Большая часть процедур, составляющих тело метода, представлена в форме алгоритмов, что упрощает его технологизацию. Конечным информационным продуктом метода является карта с распределением вероятностных оценок нефтегазоносности участков недр в пределах заданной территории исследования. Разработанный метод реализован программно и прошел тестирование на территории Восточно-Рогинцовского нефтяного месторождения. Результаты тестирования свидетельствуют о его достаточно высокой эффективности.

Ключевые слова: залежь углеводородов; геологическая, параметрическая и спутниковая информация; интегрирование гетерогенных данных; нефтегазоносность участков недр; теория свидетельств Демпстера–Шейфера.

Наукове видання



ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 1(96)

Комп'ютерна обробка статей О. Козіонова
Computer processing of the articles by O. Kozionova

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. 13,14. Наклад 300. Зам. № 222-10396.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл1.
Підписано до друку 30.03.22

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