

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

Відповідальний за випуск О. Меньшов

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР	С. Вижва, д-р геол. наук, проф.
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	О. Шабатура, д-р геол. наук, доц. (заст. головн. ред.); О. Меньшов, д-р геол. наук, ст. дослідник (відп. ред.); Г. Артеменко, д-р геол. наук, проф.; В. Бахмутов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; З. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О. Дубина, д-р геол. наук, доц.; В. Загнітко, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; В. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.; О. Іванік, д-р геол. наук, проф.; О. Карпенко, д-р геол. наук, проф.; І. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; О. Кошляков, д-р геол. наук, проф.; В. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; Б. Маслов, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О. Митрохин, д-р геол. наук, проф.; В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.; Г. Міліневський, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; В. Нестеровський, д-р геол. наук, проф.; В. Огар, д-р геол. наук, проф.; М. Орлюк, д-р геол. наук, проф.; О. Шевченко, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; В. Шевчук, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; С. Шнюков, д-р геол. наук, доц.; Т. Пастушенко, канд. філол. наук, доц.; Т. Мірончук, канд. філол. наук, доц. Іноземні члени редакційної колегії: А. Веснавер, Італійський національний інститут океанографії та прикладної геофізики, Італія; Т. Діндароглу, Університет Кахраманмарас Сутцу Імам, Туреччина; А. Ель Албані, Університет Пуатьє, Франція; К. Зенг, Китайський геологічний університет, Китай; О. Івахненко, Казахстано-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" 15 березня 2023 року (протокол № 9)
Атестовано	Вищою атестаційною комісією України. Постанова Президії ВАК України № 1-05/6 від 12.06.02
Зареєстровано	Міністерством юстиції України. Свідоцтво про Державну реєстрацію КВ № 25418-15358ПР від 03.02.23
Засновник та видавець	Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет" Свідоцтво внесено до Державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02
Адреса видавця	6-р Тараса Шевченка, 14, Київ, 01601, Україна; ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 72; факс 239 31 28

© Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
 Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2023

UDC 504+550+551+552+624

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

Chief publication manager O. Menshov

EDITOR-IN-CHIEF EDITORIAL BOARD

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

Ukrainian Members:

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

Foreign members:

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

Address

Institute of Geology, 90, Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
tel. (38044) 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 15, 2023 (Minutes # 9)

Certified by the

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

Certified by the

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

Founded and published by

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

Address

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

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

Іванік О., Шевчук В., Кравченко Д., Гадяцька К. Прогнозування зсувної небезпеки та оцінка впливу на суспільство: головні підходи, принципи, методи	5
Алієва С. Геодинамічна еволюція Каспійської мегавпадини і суміжних територій	15
Погорєлова Є., Абдулла-заде М. Антикавказська складчатість Куринсько-Південнокаспійської западини (на прикладі Південнокаспійського басейну і Передмалокавказького прогину)	23

ГЕОФІЗИКА

Шабатура О. Проблемна лабораторія фізико-хімічних досліджень гірських порід Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Пів сторіччя в університетській науці	30
Сухорада А., Меньшов О., Бондар К., Круглов О., Хоменко Р., Попов С. Геофізика педосфери в Київському університеті	36
Стовба С., Фенота П., Тищенко А., Венгрович Д., Хрящевська О. Крейдовий рифтогенез у геологічній історії Українського сектору Чорного моря	48
Бурахович Т., Кушнір А. Історія, сучасний стан та напрями розвитку геоелектромагнітних досліджень в Україні	58
Ємець В., Безродна І., Антонюк В. Моделювання ефектів заміщення флюїду у візейських відкладах Яблунівського родовища на основі інтерпретації даних ГДС та петрофізики	67

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Михайлов В. Високоперспективні об'єкти мінерально-сировинної бази України. Частина 1. Металічні корисні копалини	73
Вижва С., Курило М., Віршило І. Регіональні мінерально-сировинні бази – ключовий фактор у відбудові України у воєнний і повоєнний періоди	86
Багрий І., Гафич І., Паюк С., Солодкий Є., Ярошовець-Баранова К. Перспективи видобутку енергетичних ресурсів в астроблемах України	92
Горошкова Л., Меньшов О. Прогнозування видобування та використання нерудних корисних копалин для будівництва в умовах повоєнного відновлення України	101

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

Шевченко О., Бублясь В., Ошурок Д. Аналіз геофізичних, метеорологічних та гідрогеологічних даних для пояснення невідповідностей між інфільтрацією та атмосферними опадами	111
Ободовський О., Кривець О. Аналітичний огляд та перспективи досліджень у галузі малої гідроенергетики та гідроенергетичного потенціалу України	124

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

Вижва С., Зацерковний В., Зобнів І., Де Донатіс М., Цюпа І. Картографування головного розлому антикліналі Монте-Нероне (Марке – Північні Апенніни) та використання технології ГІС у моніторингу землетрусів	134
--	-----

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

Ivanik O., Shevchuk V., Kravchenko D., Haduatska K. Landslide hazard prediction and impact on community: main approaches, principles and methods	5
Aliyeva S. Geodynamic evolution of the Caspian megadepression and adjacent territories.....	15
Pogorelova E., Abdulla-zada M. Anti-Caucasian folding of the Kura-South Caspian Hollow (by the example of South Caspian Basin and Cis-Lesser Caucasian trough)	23

GEOFYSICS

Shabatura O. Problem laboratory of physical and chemical research of rocks of Taras Shevchenko National University of Kyiv. 50 years of university science	30
Sukhorada A., Menshov O., Bondar K., Kruglov O., Khomenko R., Popov S. Geophysics of pedosphere in Kyiv University	36
Stovba S., Fenota P., Tyshchenko A., Vengrovich D., Khriashchevska O. Cretaceous rifting in the geological history of the Ukrainian sector of the Black Sea.....	48
Burakhovich T., Kushnir A. History, current status and future prospects of geoelectromagnetic research in Ukraine	58
Yemets V., Bezrodna I., Antoniuk V. Modelling of the effects of fluid substitution in the vissean deposits of the Yablunivske field based on the interpretation of well logging data and petrophysics	67

MINERAL RESOURCES

Mykhailov V. Highly prospective objects of the mineral and raw material base of Ukraine. Part 1. Metallic minerals	73
Vyzhva S., Kurylo M., Virshilo I. Regional mineral and raw material bases as a key factor in the development of Ukraine during the war and post-war periods.....	86
Bagriy I., Hafych I., Payuk S., Solodkyy E., Yaroshovets-Baranova K. Prospects for extraction of energy resources in astroblems of Ukraine	92
Horoshkova L., Menshov O. Extraction and utilization forecasts for the construction non-metallic minerals in post-war recovery period of Ukraine	101

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

Shevchenko O., Bublyas V., Oshurok D. Combination of geophysical and hydrogeological data to explain contradictions between infiltration and atmospheric precipitation	111
Obodovskiy O., Kryvets O. Analytical review and prospects of research in the field of small hydroenergetics and hydroenergetic potential of Ukrainian rivers.....	124

GEOINFORMATICS

Vyzhva S., Zatserkovnyi V., Zobniv I., De Donatis M., Tsiupa I. Application of geo-information technologies in determining the depth of earthquake in the Monte Nerone district (Marche district, Northern Apennines in 1781).....	134
---	-----

О. Іванік, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: ivanik@knu.ua;

В. Шевчук, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: svgeol44@gmail.com;

Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: dmytro.kravchenko@knu.ua;

К. Гадяцька, канд. геол. наук, асист.,
E-mail: k.hadiatska@knu.ua;

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

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗСУВНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА ОЦІНКА ВПЛИВУ НА СУСПІЛЬСТВО: ГОЛОВНІ ПІДХОДИ, ПРИНЦИПИ, МЕТОДИ

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

Проблема прогнозування зсувної небезпеки є пріоритетним напрямом досліджень у сфері оцінки георизиків та катастроф природного характеру, яка, незважаючи на вибір тих чи інших підходів щодо її розв'язання, вимагає всебічного поглибленого аналізу чинників формування зсувів, а також синтезу наукових та фондових матеріалів для повного розуміння проблеми зсувної небезпеки та комплексної оцінки її впливу на суспільство. Представлені у даній статті дослідження спрямовані на розробку, впровадження та апробацію комплексної методики прогнозування зсувної небезпеки та оцінки її впливу на функціонування природно-техногенних систем різного призначення в межах України. Дослідження проводились у рамках державних та міжнародних проєктів із залученням міжнародних партнерів з університетів Франції, Австрії та Великої Британії. Методика регіонального прогнозування зсувної небезпеки в межах різноструктурних регіонів України базується на методах просторового моделювання та геоінформаційного аналізу з метою прогнозного картування, отримання оцінки ймовірного розвитку гравітаційних процесів, створення моделей багатофакторної просторової оцінки. У результаті комплексного аналізу чинників зсувної небезпеки та просторового моделювання створено інтегральні карти зсувної небезпеки, що дають можливість комплексно оцінити стан зсувонебезпеки для кожного регіону. Методики локального прогнозування зсувної небезпеки на основі застосування раціонального комплексу геологічних, геофізичних, дистанційних, термографічних досліджень, а також детермінованого моделювання дозволяють виявити головні ознаки та визначити ділянки потенційного розвитку зсувних процесів у межах окремих зсувонебезпечних ділянок та запропонувати комплекс превентивних заходів щодо мінімізації та уникнення їх негативної дії. Наведено приклади застосування комплексної методики прогнозування зсувної небезпеки в межах модельних ділянок Канівського та Київського Придніпров'я та запропоновано концепцію інформування населення щодо потенційних геонебезпек.

Ключові слова: зсувна небезпека, стійкість схилів, прогнозування, детерміноване моделювання.

Вступ та постановка проблеми. Проблема прогнозування впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування інфраструктурних об'єктів з метою запобігання надзвичайним ситуаціям та уникнення економічних і соціальних проблем є однією з найактуальніших проблем у сфері оцінки георизиків та катастроф. Розв'язання цієї проблеми охоплює два аспекти: перший – цільові територіальні дослідження, спрямовані на пізнання природи та уточнення механізму формування і поведінки у геологічному середовищі небезпечних явищ з урахуванням природних чинників та факторів техногенного впливу, і другий – розроблення сучасних ефективних засобів інформаційно-аналітичного забезпечення цільових досліджень і заходів, спрямованих на попередження небезпечних геологічних процесів та їх адекватну якісну та кількісну оцінку (Баєрій та ін., 2004; Демчишин, 1992; Іванік та ін., 2016; Лисиченко та ін., 2008; Національна..., 2020; Прогнозування..., 2016).

Всі геологічні процеси, що відбуваються в надрах Землі та на її поверхні, діють у тому чи іншому полі гравітації, але так склалося, що до гравітаційних процесів відносять лише екзогенні, передусім обвали, осипи, камінепади і зсуви. Враховуючи співставний за наслідками вплив води (обводненості геологічних середовищ) чи флюїдів загалом, також виділяють в окрему класифікаційну категорію водно-гравітаційні процеси, доповнюючи список явищ опливами, селями і т. ін. Таке розмежування екзогенних та ендемогенних процесів, пов'язаних із гравітацією, зручне, але не зовсім коректне, хоча б тому, що вплив тектонічних рухів ендемогенної природи має визначальне значення у розвитку екзогенних

гравітаційних процесів. Тобто прогнозна оцінка розвитку екзогенних гравітаційних процесів не може бути успішною без врахування тенденцій тектонічної еволюції того чи іншого регіону. Отже, у визначенні провідних і підпорядкованих факторів гравітаційних та водно-гравітаційних процесів не варто обмежуватись умовностями. Впевнено можна сказати, що тисячолітня історія досліджень і самих процесів, і факторів, що спричиняють їхній розвиток, позначилась мало не цілковитим розумінням суті процесів і їх наслідків, прогновної оцінки ймовірності виникнення і шляхів розвитку, розробкою ефективних комплексних засобів запобігання і боротьби з небезпечними для людини явищами. У теоретичному плані відомо багато, майже все необхідне. Розроблено детальні класифікації гравітаційних процесів, запропоновано методи їх оцінки та прогнозування, висвітлено питання щодо детальних рекомендацій їх запобігання та мінімізації впливу (Hung et al., 2014). Такий стан досягався колосальним обсягом і різноманітністю емпіричних даних, отриманих не лише в межах континентів, але й морів і океанів, розвитком експериментальних досліджень, інженерних розрахунків (XX ст.) та сучасного математичного моделювання. Нові теоретичні дані досягаються усе рідше, деякі традиційні методи досліджень себе вичерпують, розробка нових – це складний і непередбачуваний шлях. Теоретично невідоме у цих процесах пов'язане з неймовірною різноманітністю геологічних середовищ, ситуацій, комбінаційності факторів впливу, у тому числі випадкових. Саме такі обставини мають безпосередній вплив на людську життєдіяльність.

Проблема прогнозування зсувної небезпеки є пріоритетним напрямом досліджень у сфері оцінки ризиків та катастроф природного характеру, яка, незважаючи 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 (Іванік та ін., 2020). Світовий досвід у сфері дослідження гравітаційних процесів показав значну ефективність застосування комплексного синергетичного підходу до їх оцінки при попередженні і прогнозуванні негативного впливу зсувних процесів (Foster et al., 2008, 2012; Garsia Rodriguez et al., 2008; Pan et al., 2008).

Сучасні прогнозні методики та підходи моделювання гравітаційних поєсів при попередженні і прогнозуванні негативного впливу зсувних процесів регіонального рівня розроблені фахівцями Геологічної служби Великої Британії, США, Японії та інших країн. Методи моделювання та ГІС активно застосовуються для отримання оцінки ймовірного розвитку зсувів, створення моделей багатofакторної просторової оцінки та прогнозного картування (Abbaszadeh Shahri and Maghsoudi Moud, 2021; Nohani et al., 2019; Zhou et al., 2021). При цьому для створення ймовірнісних моделей зсувної небезпеки високої роздільної здатності використовуються нейронні мережі (Elmoulat et al., 2020). Для локального прогнозування зсувів виконується детальне вивчення зсувних процесів і зсувонебезпечних об'єктів із використанням геологічних, геоморфологічних, геофізичних та дистанційних методів та подальшим застосуванням детермінованого моделювання для оцінки стійкості схилів (Biswakarma et al., 2020; Cees, 2020; Daout et al., 2021). Важливою проблемою є вибір реологічних моделей при моделюванні зсувного процесу та розробці фізико-геологічних моделей породних комплексів у межах зсувних схилів (Wu, 2015).

У сучасних дослідженнях значного використання набувають методи машинного навчання та штучного інтелекту, що використовуються для запобігання зсувам, головним чином зосереджуючись на виявленні зсувів на основі даних дистанційного зондування Землі, оцінці сприйнятливості територій до виникнення та активізації зсувів та розробці систем попередження про зсуви (warning systems) (Ma et al., 2021).

Однак, незважаючи на великий обсяг запропонованих підходів, методик та методів, слід зазначити, що кожен регіон має свої особливості як з погляду розвитку геологічних процесів, так і з позиції розвитку інфраструктури, будівництва, виробництва тощо. Отже, цілеспрямовані регіональні дослідження є необхідними, а нові досягнення у детальному вивченні конкретних потенційно небезпечних регіонів та районів завжди матимуть важливе якщо не теоретичне, то прикладне значення.

Представлені у даній статті дослідження спрямовані на розробку, впровадження та апробацію комплексної методики прогнозування зсувної небезпеки та оцінки її впливу на функціонування природно-техногенних систем різного призначення в межах України. Дослідження проводились у рамках державних та міжнародних проєктів із залученням міжнародних партнерів з університетів Франції, Австрії, Великої Британії.

Головні принципи та методи регіонального прогнозування зсувної небезпеки. Регіональне прогнозування зсувної небезпеки може бути як якісним, так і кількісним, і проводиться як за допомогою стохастичних, так і детермінованих методів. В основі регіональних прогнозів – спеціальне районування території, що

характеризує поширення зсувів, умови їх виникнення та активізації, а також визначає ймовірність їх виникнення в межах певних територій. До класу методів якісного прогнозування зсувної небезпеки належать методи, що базуються на експертних оцінках та методи оцінки стійкості території в балах. До існуючих методик регіонального прогнозування зсувів належать такі: методика прогнозування за допомогою методу логічного повернення до попереднього стану; методика із залученням ROC аналізу (receiver operating characteristic curve analysis), оверлейний аналіз та ін (Cees, 2000; Foster et al., 2008; Garsia Rodriguez et al., 2008; Gorsevski et al., 2006; Pan et al., 2008; Saha et al., 2005). До методів прогнозу, що використовують статистичні методи, належать методи геодинічного потенціалу, регресійного аналізу, багатовимірної статистики та інші.

Методика регіонального прогнозування зсувної небезпеки в межах різноструктурних регіонів України базується на методах просторового моделювання та геоінформаційного аналізу з метою прогнозного картування, отримання оцінки ймовірного розвитку гравітаційних процесів, створення моделей багатofакторної просторової оцінки (Кошляков та ін., 2003).

Інформація, отримана під час комплексних досліджень зсувних процесів, належить до особливого типу геоінформації, яка характеризує положення досліджуваних об'єктів у системі просторових координат. Така інформація повинна стати багатocільовим інформаційним ресурсом. Існуючі на сьогодні великі масиви даних щодо гравітаційних процесів та їх різномірних характеристик є особливим об'єктом геоінформаційних та моніторингових досліджень, що потребують застосування методологічних прийомів на новому інформаційному рівні. З метою просторового аналізу небезпечних геологічних процесів, оцінки чинників їх формування та активізації, а також з метою їх прогнозування на регіональному та локальному рівні виникає потреба у створенні відповідної геобаз даних. Геобаз даних зсувних процесів за типами взаємовідношення просторової та атрибутивної інформації є геореляційною і характеризується певними типами зберігання позиційних та атрибутивних даних. Крім цього, геобаз даних акумулює в собі змістові дані щодо процесів та чинників зсувоутворення, відомості про їх територіальну і часову прив'язку тощо. Водночас геореляційна база даних зсувних процесів і факторів їх виникнення є основою для інвентаризації, моніторингу та регіонального прогнозування зсувних процесів, що і пропонується використовувати в більшості регіональних досліджень.

Формування геобаз даних містить у собі концептуальний, логічний та фізичний рівні, на кожному з яких створюється відповідна модель (Іванік та ін., 2019). Геобаз даних зсувів створюється на основі власних польових спостережень та фондових матеріалів, кожний із записів якої містить інформацію, охарактеризовану певними атрибутами, включаючи *морфометричні параметри зсувних тіл* з характеристиками їхньої форми, типу, ширини, довжини, об'єму зсувних мас, площі поширення, місця їх локалізації в межах схилу з точними абсолютними відмітками, механізм зміщення зсуву, чинники виникнення; *характеристик зсувних схилів*, включаючи дані про експозицію, крутизну, протяжність, висоту та форму схилу в плані, його геоморфологічну належність, літологічний склад основних деформуючих горизонтів (ОДГ) та гідрогеологічні умови. Ці дані разом із подальшим просторовим аналізом та моделюванням дозволяють розробити прогнозно-еталонні критеріальні моделі зсувних процесів; запропонувати перелік критеріїв і ознак їх

формування та створити регіональні карти ймовірності виникнення зсувів.

Регіональне прогнозування зсувних процесів базується на основі поглибленого вивчення стану геологічного середовища та впливу статичних та динамічних факторів, які тісно пов'язані між собою. До числа статичних належать: (1) *літолого-стратиграфічні умови*: наявність у розрізі схилу порід різної водопроникності, що залежить від щільності порід та їх мікроструктури, яка впливає на характер і тип прояву деформаційного процесу, а отже і на тип формування зсуву; (2) *морфологія рельєфу*: величина вертикального та горизонтального розчленування рельєфу, показники абсолютних відміток, крутизна схилів та їх експозиція; (3) *гідрогеологічний режим*: глибина залягання поверхневих та ґрунтових вод, наявність і витримана потужність водотриву в основі водоносного горизонту, а також тип порід, що складають водоносний горизонт. До динамічних факторів відносять змінні в часі процеси, що впливають на стан схилів: (i) *тектонічний режим території* – прояв неотектонічних та сучасних тектонічних рухів, що є одним із

провідних факторів зсувоутворення; (ii) *прояв екзогенних процесів*; (iii) *сейсмічність*; (iv) *техногенні навантаження*, у тому числі вібраційні.

Для оцінки чинників зсувної небезпеки використовуються такі тематичні карти та відповідні тематичні шари: цифрові моделі рельєфу, літолого-стратиграфічні карти, карти четвертинних відкладів, тектонічні карти, гідрогеологічні карти, карти крутизни схилів, карти експозиції схилів, дані щодо просторового положення зсувів тощо. Для просторового аналізу та побудови прогнозних карт зсувної небезпеки здійснюється векторизація різномасштабних (1:200 000 – 1:50 000) геологічних карт території, тектонічних карт, гідрогеологічних карт, карт четвертинних та дочетвертинних відкладів із формуванням відповідних шарів полігонального та лінійного типу геометрії, та зсувних об'єктів точкового типу геометрії.

З метою оцінки впливу факторів на формування зсувних процесів створюється низка просторових моделей (тектонічних, геоморфологічних, геологічних, структурно-морфометричних та ін.) (рис. 1).

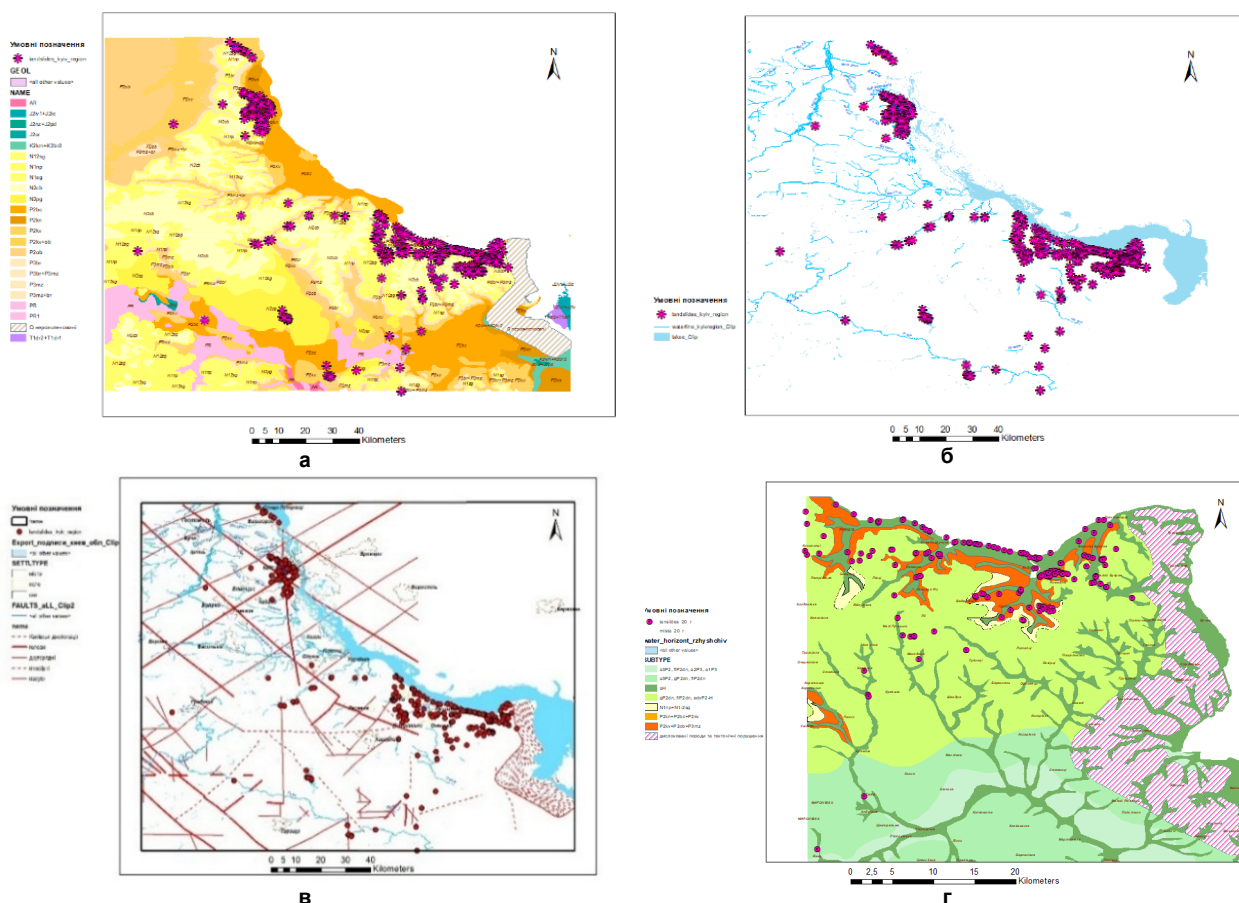


Рис. 1. Різномасштабні моделі для оцінки зсувної небезпеки Середнього Придніпров'я:

а) векторна модель літолого-стратиграфічних комплексів; б) гідрологічна модель; в) структурно-тектонічна модель; г) гідрогеологічна модель

У результаті комплексного аналізу чинників зсувної небезпеки та просторового моделювання створюються інтегральні карти зсувної небезпеки як для території в цілому, так і для окремих ділянок, що дають можливість комплексно оцінити стан зсувонебезпеки для кожного регіону. Для побудови *прогнозно-еталонної моделі зсувної небезпеки* на основі просторового аналізу та моделювання, схему якого представлено на рис. 2, виконується комплексний аналіз чинників формування зсувних

процесів. Засобами рекласифікації здійснюється ранжування кожного фактору за ступенем впливу на зсувоутворення. На основі функції Weighted Overlay (Spatial Analyst) створюється інтегральна карта ймовірності виникнення зсувів певної території. Отже, прогнозна карта (рис. 3) створюється методом оверлейних перетворень, що дає можливість одночасного врахування розглянутих факторів та розробки комплексної моделі зсувонебезпеки регіону.

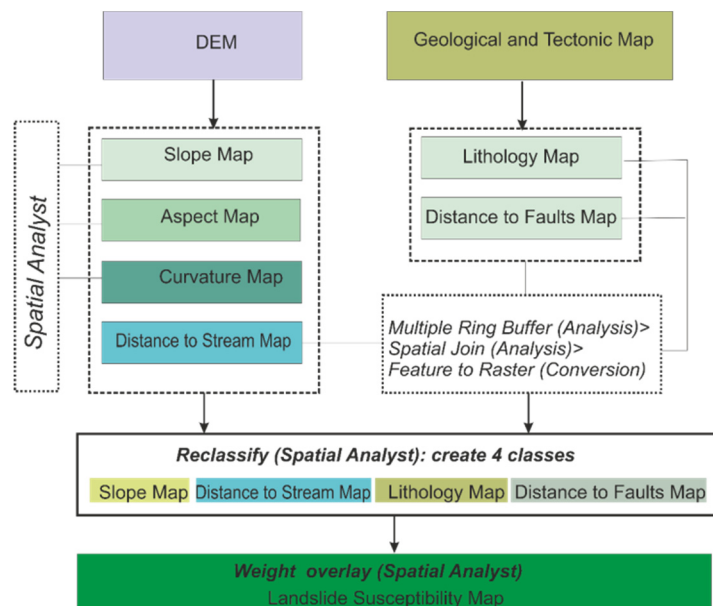


Рис. 2. Схема розробки моделі зсувонебезпеки на основі просторового аналізу та моделювання

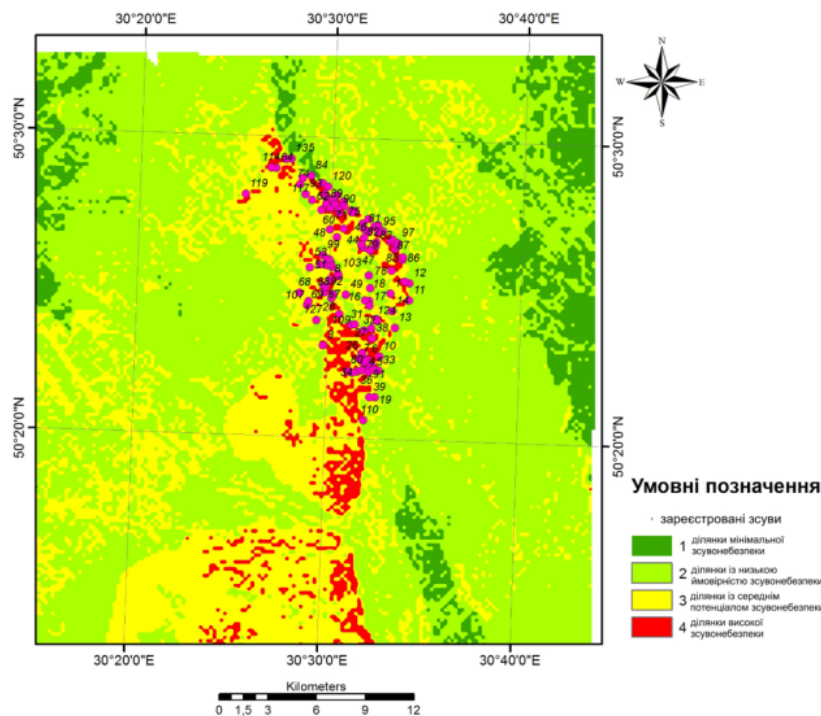


Рис. 3. Прогнозна інтегральна карта зсувонебезпеки Київського Придніпров'я

Головні підходи та методи локального прогнозування зсувної небезпеки. Проведення генетичного аналізу зсувів, вивчення їхньої динаміки та режиму можливе тільки під час детальних досліджень, визначенні пріоритетності впливу кожного з факторів на процес зсувоутворення. Саме такі роботи становлять основу локального прогнозування зсувної небезпеки. Загалом методи локального прогнозування мають на меті оцінку динаміки стану зсувонебезпечних схилів та зсувних тіл та аналіз стійкості схилів з метою прогнозування небезпеки розвитку зсувного процесу.

На основі локальних прогнозів досліджуються певні типи схлизових процесів, визначається їхня локалізація та взаємодія з конкретними інженерними спорудами (Whiteley et al., 2019). 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, наприклад, такі як наземні радіолокаційні системи із синтезованою апертурою (GB-InSAR). Їх використовують для моніторингу деформації поверхні землі, оцінки можливого ризику зсуву та аналізу тенденції руху (Frodella et al., 2018; Daout et al., 2021). Ці методи дають можливість краще оцінити природу, механізм та головні фактори зсувного процесу.

Для вирішення задач аналізу динаміки стану зсувонебезпечних схилів оптимальним та ефективним є використання даних дистанційного зондування Землі, що

модуть бути застосовані для кількісної оцінки змін, які виникли внаслідок природних та антропогенних чинників активізації зсувних процесів. Серед методів дослідження зсувів із застосуванням даних дистанційного зондування Землі слід виділити:

- дешифрування аерофотознімків;
- використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та створення тривимірних моделей зсувів;
- інтерпретацію оптичних зображень, аналіз мультиспектральних зображень, використання даних SAR-радарів із синтезованою апертурою та ін.

Крім того, дані, отримані БПЛА, використовуються для створення цифрових моделей рельєфу високої розрізненості, а також точних обстежень поверхні зсувів (рис. 4). Точність моделі залежить від високоякісних вхідних даних. Використовуючи безпілотники, є можливість визначити загальні морфометричні характеристики зсувних схилів та тіл, а також визначити ймовірний механізм зсуву.



Значні результати щодо детальних характеристик будови зсувних тіл та зсувонебезпечних схилів отримують завдяки використанню численних інструментальних моніторингових спостережень (Hack, 2002; Прогнозування..., 2016; Кузьменко та ін., 2009). Методика локального прогнозування зсувної небезпеки для оцінки стану зсувних схилів на основі комплексу інструментальних неінвазивних геофізичних та термографічних методів розроблена на прикладі модельних ділянок у межах Середнього Придніпров'я (Ivanik et al., 2022).

До даного комплексу методів належать такі: метод самочинної поляризації, метод електротомографії, георадарні дослідження, методи інфрачервоної термографії, які вирізняються високою детальністю спостережень, експресністю та простотою у використанні (Telford, 1990; Santoso et al., 2019; Ivanik et al., 2020). Дані, отримані за допомогою вищезгаданих методів, застосовуються для дослідження літолого-стратиграфічних умов, геометрії тіла зсуву та потенційного руху зсувних мас (рис. 5).

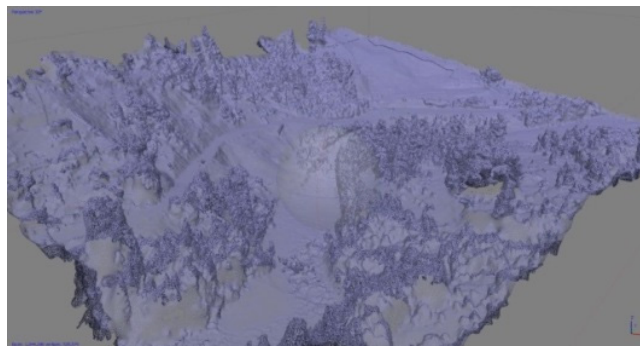


Рис. 4. Тривимірна модель зсуву в с. Красник, Верховинський район Івано-Франківська обл. (за даними знімання з БПЛА)

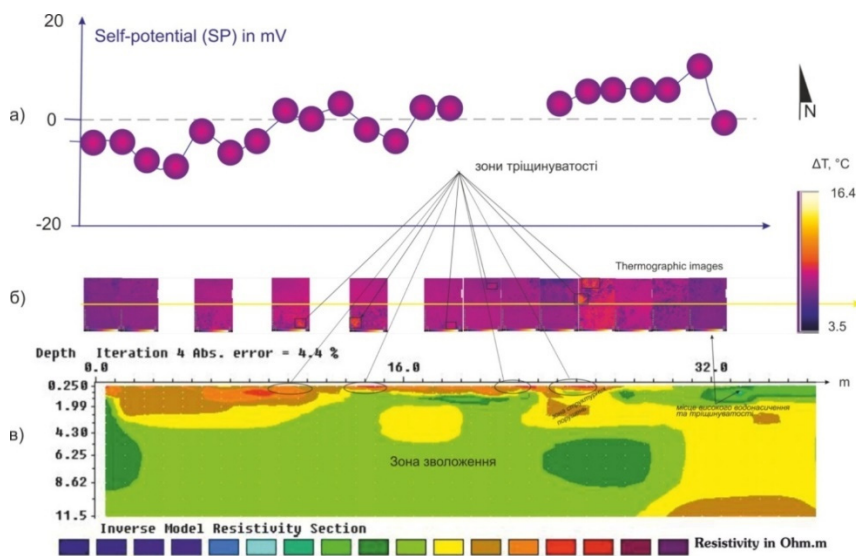


Рис. 5. Приклад комплексного застосування неінвазивних геофізичних методів та інфрачервоної термографії для оцінки зсувної небезпеки в межах модельного об'єкта "Глинка", м. Київ:

а) графік розподілу кривої самопотенціалу; б) термограми; в) частина геоелектричного розрізу по профілю ERT4 (з 1 по 36 пікет)

Метод самочинної поляризації застосовується для відслідковування рівня ґрунтових вод та водних потоків у межах схилу (Patella, 1997; Reynolds, 1997). Спостереження проводять шляхом вимірювання природної різниці електричних потенціалів між парами електродів, підключених до вольтметра високого опору. Електророзвідувальні роботи широко застосовуються для виявлення та

простеження тріщинуватих зон і зон тектонічних порушень, що дозволяє виявити обводнені ділянки.

Метод електротомографії (ERT) застосовується для локального прогнозування зсувних процесів з метою одночасного вивчення розрізу уздовж профілю й по глибині, що дозволяє простежувати не лише горизонтально-шаруватий розріз, а й неоднорідне середовище. Також цей

метод дає змогу виявити особливості будови зсувних тіл та відстежити нові тріщини і заколи на зсувонебезпечних ділянках. Завдяки методиці проведення досліджень (ERT) можна виконувати інтерпретацію не лише у 2D, а й у 3D варіанті, за рахунок високої щільності спостережень, які досягаються шляхом використання багатоканальної установки (64-електродної), що дозволяє вимірювати різницю потенціалів одночасно на декількох приймальних електродах (Loke, 2009; Khomenko et al., 2013).

В основі георадарних досліджень є явище відбиття електромагнітних хвиль від границь поверхонь розділу, на яких відбувається зміна електричних властивостей. Основним параметром середовища виступає діелектична проникність. Даний метод широко використовується

в інженерній геофізиці з метою вивчення геологічного розрізу, визначення рівня ґрунтових вод, а також для картування карстових та зсувних структур.

Також для дослідження зсувної небезпеки локальних об'єктів використовується дистанційний метод інфрачервоної термографії, що дозволяє виявляти структурні порушення та зони підвищеної обводненості зсувних схилів, а отримання високорозрізнених термограм земної поверхні з максимально малих відстаней є високоінформативним методом у геологічних дослідженнях (Frodella et al., 2014). За допомогою даного методу та спеціальних польових досліджень визначається склад та структура найнебезпечніших зсувів (рис. 6).

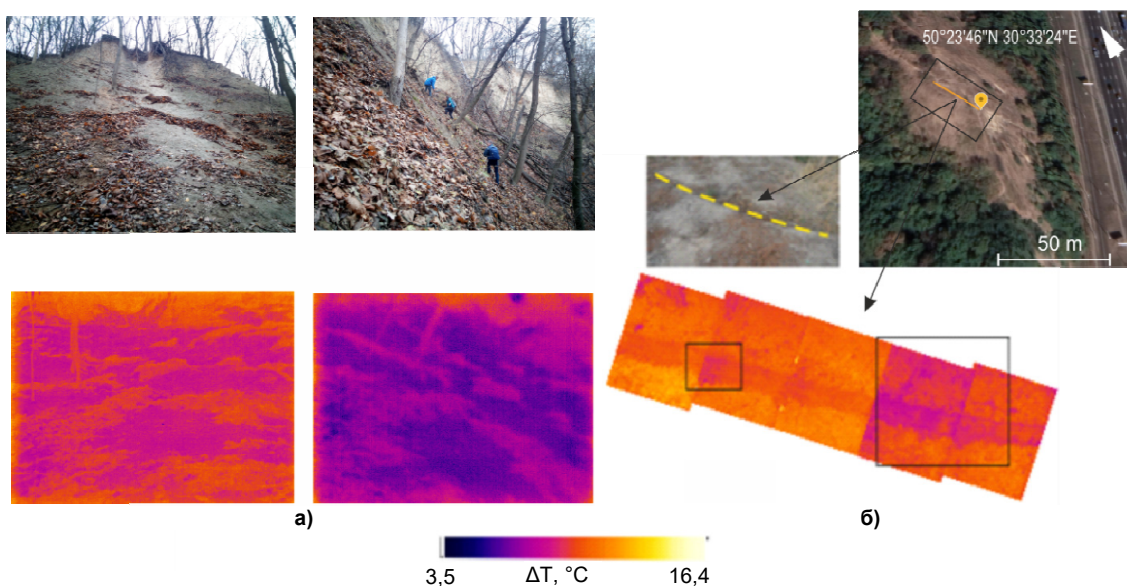


Рис. 6. Термограми в межах модельної ділянки "Лиса гора" (Київ):

а) термограма зсувного схилу на ділянці № 2 Лисої Гори (50°23'40" пн 30°33'19"E);

б) термограма профілю 1, виконаного у верхній частині зсуву (50°23'46"N 30°33'24"E) (перпендикулярно до зсувного уступу)

Інфрачервона термографія здійснюється за допомогою інфрачервоної термокаліброваної камери, датчики якої виявляють теплове випромінювання, яке перетворюється вбудованим процесором на карту температури поверхні досліджуваної ділянки. Виконання термографічних досліджень проводиться за допомогою інфрачервоної камери *Optris® PI640* з об'єктивом 33°. За допомогою програмного забезпечення *Optris® PIX Connect* отримуються термограми досліджуваних ділянок, що представлені за допомогою кольорової шкали. Більш низькі значення температури поверхні представлені темно-синіми кольорами, тоді як більш високі значення відображаються світло-жовтими кольорами. Теплові аномалії при дослідженні зсувів вказують 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, спричинене випаровуванням води).

Високу ефективність у вивченні динаміки зсувних процесів мають методи геомагнітних досліджень, що використовуються для визначення потенційності зсувного процесу та аналізу швидкості та напрямку переміщень (Menshov et al., 2018).

Під час вивчення локальної стійкості зсувів широке застосування знаходять методи математичного моделювання. Ці методи поділяються на групу традиційних методів інженерних розрахунків та групу чисельних методів аналізу. Традиційні методики базуються на методах граничної рівноваги, методах кінематичного аналізу та методах статистичного аналізу руху. До другої групи належать методи, що базуються на механіці суцільного середовища, механіці дискретного середовища та гібридні методи. Слід зауважити, що означені методи вирішують велику частину прикладних завдань щодо забезпечення стійкості схилів, однак вони значною мірою схематизують як геологічні умови схилів, так і особливості зсувних зміщень. Безумовно додаткового врахування потребують питання розподілу напружень у породних комплексах схилу, анізотропія, наявність різномасштабних тектонічних порушень, відмінність геомеханічних параметрів тощо. Необхідним є подальше дослідження та удосконалення методів розрахунків стійкості неоднорідних схилів, аналіз впливу тригерних факторів тощо.

Частково означені питання вирішуються на основі аналізу напружено-деформованого стану схилу із врахуванням низки геологічних та геоморфологічних факторів, що стосуються переважно аналізу впливу підвищеної тріщинуватості, наявності надмірної обводненості породних комплексів, існування надмірного

навантаження на зсувонебезпечний схил і базових фізико-механічних характеристик. Для модельних зсувонебезпечних схилів здійснено постановку задачі розрахунку НДС та визначено ступінь схематизації (формалізації) розрахунків (Ivanik, 2015). На основі застосування спеціалізованого програмного забезпечення *GeoStudio2018* визначається розподіл напружень (рис. 7). Водночас використовуються різні реологічні

моделі. У процесі моделювання зсувне тіло розбивається на вертикальні відсіки (блоки). Для того щоб оцінити прогноз інженерно-геологічних змін у межах певної ділянки схилу, створюються дві геомеханічні моделі: для природного рівня водонасичення ґрунтів та прогнозованого, що дає змогу здійснити прогноз зсувного процесу за критичних умов.

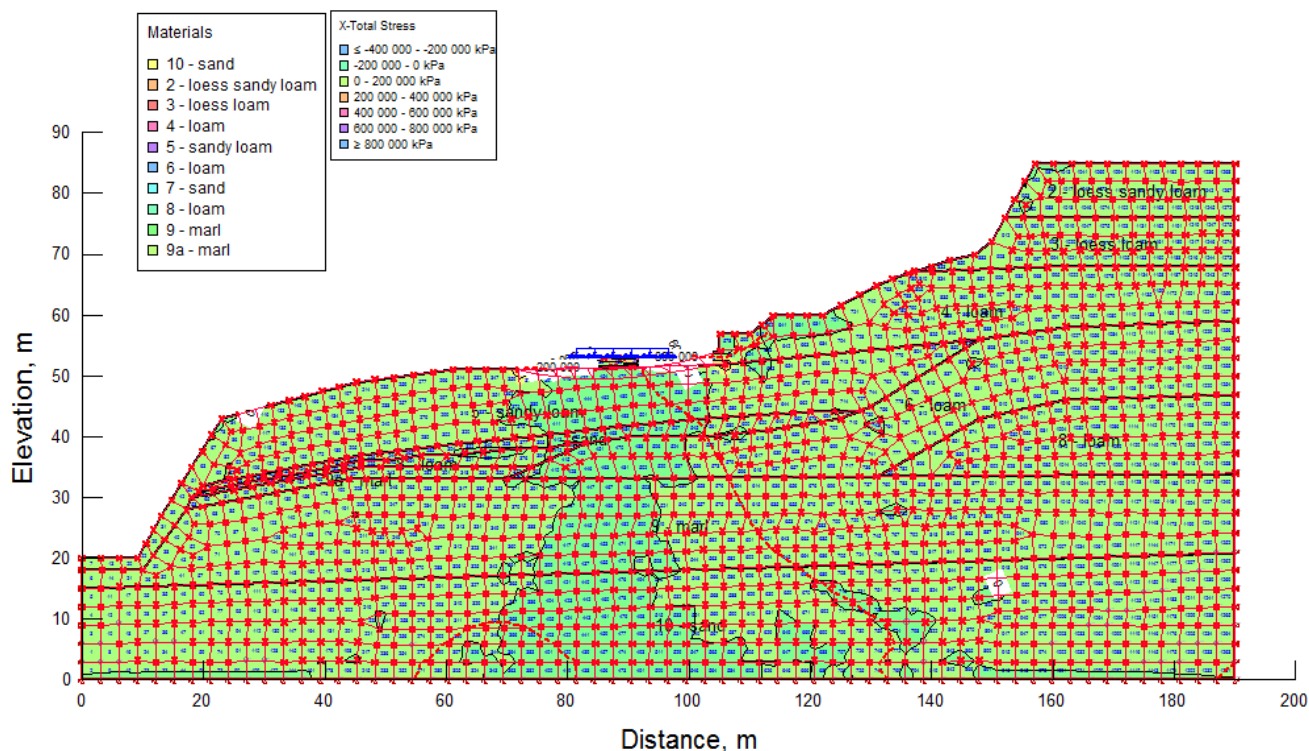


Рис. 7. Розподіл напружень у межах зсувонебезпечного схилу, модельна ділянка "Ржищів", Київська обл.

Оцінка впливу зсувної небезпеки на суспільство та розробка стратегії інформування населення щодо потенційних геонебезпек.

Зсувонебезпе́ка є важливою складовою екологічної безпеки територій. Запобігання та мінімізація наслідків негативного впливу розвитку зсувних процесів пов'язані передусім із прогнозуванням та стратегією інформування населення щодо потенційних геонебезпек. Прогнозування зсувів як надзвичайної ситуації потребує здійснення певних дій у певній їх послідовності, тобто може бути алгоритмізоване. З метою запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, спричинених формуванням та активізацією зсувів, необхідно: удосконалити механізм регулювання та контролю за проведенням господарської діяльності на зсувонебезпечних територіях; здійснити економічно обґрунтовані протизсувні заходи до початку господарського освоєння зсувонебезпечних територій; визначити межі зсувонебезпечних ділянок та здійснити районування території за ступенем зсувонебезпеки, включаючи урбанізовані території, промислові агломерації та інші складні природно-техногенні системи; забезпечити належний рівень інформування населення щодо питань здійснення протизсувних заходів.

Щоб забезпечити ефективність стратегії інформування, вона має бути орієнтована на локальні адресні групи населення. Мета подібної стратегії полягає у використанні потенціалу окремих осіб та цілих громад, що наражаються на небезпеку зсувів, з метою вжиття ними

необхідних і своєчасних заходів щодо зниження ймовірності загибелі, шкоди довкіллю та втрати засобів існування.

Метою стратегії інформування населення щодо зсувних небезпек є сприяння досягненню сталого розвитку, інтеграція системи запобігання ризикам зсувної небезпеки у процеси інституційних реформ та зміцнення спроможності територіальних громад з протидії зсувів. Передбачається, що Стратегія забезпечить уніфікований підхід до протидії природним загрозам. Сучасне бачення головних пріоритетів полягає в тому, що на протигагу діяльності, спрямованої лише на ліквідацію наслідків зсувів, основну увагу слід зосереджувати на мінімізації ризиків втрат і збитків, спричинених цими небезпечними явищами. Перспективи подальших наукових досліджень визначаються необхідністю ґрунтовного опрацювання організаційних та правових засад державного управління, переосмислення основних категорій у цій сфері.

Висновки. Комплексна методика прогнозування зсувної небезпеки регіонального та локального рівня спрямована на розробку засобів прогнозування зсувної небезпеки та оцінки впливу небезпечних процесів на інфраструктурні об'єкти. Оцінка та прогнозування зсувних процесів базується на створенні та аналізі комплексу фізико-геологічних та математичних моделей та передбачає два підходи. Перший ґрунтується на аналізі чинників формування зсувних процесів та їх регіональному прогнозуванні із застосуванням методів дистанційного зондування Землі, ГІС-аналізу та моделювання. Другий

підхід передбачає моніторинг та детерміноване моделювання зсувних процесів з метою локального прогнозування із залученням комплексу дистанційних, геофізичних методів та інфрачервоної термографії.

Комплексний інтегральний аналіз факторів зсувотворення дозволяє створити прогнозно-еталонну модель формування водно-гравітаційних явищ, що слугують основою для прогнозування зсувів на регіональному рівні. Методики побудови карт імовірності виникнення зсувів можуть бути використані для створення регіональних карт прогнозу небезпечних геологічних процесів. Методики локального прогнозування зсувної небезпеки на основі застосування раціонального комплексу геологічних, геофізичних, дистанційних, термографічних досліджень, а також детермінованого моделювання дозволяють виявити головні ознаки та визначити ділянки потенційного розвитку зсувних процесів у межах окремих зсувонебезпечних ділянок та запропонувати комплекс превентивних заходів щодо мінімізації та уникнення їх негативної дії. Методичні розробки у вигляді розроблених ГІС-проектів, прогнозних карт поширення зсувних процесів та рекомендацій щодо мінімізації їх негативного впливу можуть бути запропоновані для використання державними та недержавними природоохоронними та екологічними організаціями, підприємствами геолого-геофізичного, геодезичного та будівельного профілю, а також військовими службами та органами місцевого самоврядування.

Подяки. Представлені дослідження виконувались у рамках держбюджетної НДР №21БП049-02 "Прогнозування зсувної небезпеки регіонального та локального рівня та оцінка впливу на суспільство", Міжнародного наукового проекту "Протистояння зсувній небезпеці: суспільні виклики" (за підтримки Global Challenges Research Fund (GCRF)), програм PAUSE (фінансування урядом Французької Республіки) та JESH (фінансування академією наук Австрії). Автори висловлюють щире вдячність усім організаціям, що сприяли виконанню даних досліджень.

Список використаних джерел

- Багрий, І.Д., Бліпов, П.В., Гожи, П.Ф., Кожем'якін, В.П. (2004). Активізація небезпечних геологічних явищ у Закарпатті як наслідок екстремальних паводків. К., 210 с.
- Вижва, С., Онишук, В., Рева, М., Шабатура, О. (2020). Геофізичні дослідження зсувних територій правого берега річки Дніпро (Лісостепова зона). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(90), 17–20.
- Демчишин, М.Г. (1992). Современная динамика склонов на территории Украины. Киев: Наук. думка, 256 с.
- Іванік, О.М., Шевчук, В.В., Лавренко, М.В. (2020). Моделювання впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування природно-техногенних систем. К.: ВПЦ "Київський університет", 351 с.
- Іванік, О.М. (2008). Просторовий аналіз та прогнозна оцінка формування водно-гравітаційних процесів на основі ГІС у Карпатському регіоні. *Геоінформатика*, 4, 52–58.
- Іванік, О., Шевчук, В., Кравченко, Д., Гадяцька, К. (2019). Національна база даних зсувних процесів: принципи розробки, впровадження та застосування для оцінки зсувної небезпеки регіонального та локального рівня. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(86), 70–74. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.10>
- Кошляков, О.Є., Ішук, О.О., Кризька, Н.М. (2003). Визначення потенційних зсувних ділянок правого схилу р. Дніпро в м. Києві за допомогою технології ГІС. *Матеріали IV Міжнар. конф. "Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища", 9–11 жовтня 2003 р. К.: ВПЦ "Київський університет"*, 157 с.
- Кузьменко, Е.Д. (2016). Прогнозування зсувів. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 601 с.
- Кузьменко, Е.Д., Безсмертний, А.Ф., Вдовина, О.П., Крив'юк, І.В., Чебан, В.Д., Шотгорн, Л.В. (2009). Дослідження зсувних процесів геофізичними методами. За ред. Е.Д. Кузьменка. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 294 с.
- Лисиченко, Г.В., Забулонов, Ю.Л., Хміль, Г.А. (2008). Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. К.: Наук. думка, 542 с.
- Шпак, В.І. (2020). Національна безпека України у викликах новітньої історії. К.: ДП "Експрес-об'ява", 468 с.

Хоменко, Р., Бондар, К., Попов, С. (2013). Нова малоглибинна багатоелектродна установка вимірювання електричного опору. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(61), 36–41.

Abbaszadeh Shahri, A., Maghsoudi Moud, F. (2021). Landslide susceptibility mapping using hybridized block modular intelligence model. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 80(1), 267–284. <https://doi.org/10.1007/10064-020-01922-8>

Biswakarma, P., Barman, B.K., Joshi, V., Rao, K.S. (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

Cees, J. Van Westen (2000). The Modelling Of Landslide Hazards Using Gis. *Surveys in Geophysics*, 21, 2–3, 241–255.

Daout, S., Parsons, B., Walker, R. (2021). Post-Earthquake Fold Growth Imaged in the Qaidam basin, China, With InSAR. *JGR: Solid Earth*, 126, e2020JB021241. <https://doi.org/10.1029/2020JB021241>

Elmoulat, M., Debauche, O., Mahmoudi, S., Mahmoudi, S.A., Manneback, P., Lebeau, F. (2020). Edge Computing and Artificial Intelligence for Landslides Monitoring. *Procedia Computer Science*, 177, 480–487. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.066>

Foster, C., Pennington, C.V.L., Culshaw, M.G., 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., Ciampalini, A., Bardi, F. et al. (2018). A method for assessing and managing landslide residual hazard in urban areas. *Landslides*, 15, 183–197. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0875-y>

Frodella, W., Morelli, S., Gigli, G., Casaghi, N. (2014). Contribution of infrared thermography to the slope instability characterization. *World Landslide Forum 3. 2–6 June*, Beijing, China, 06/2014.

Garsia Rodriguez, M.J., Malpica, J.A., Benito, B., Diaz, M. (2008). Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology*, 95, 172–191.

Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Foltz, R.B., Elliot, W.J. (2006). Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis. *Transaction in GIS*, 10, 395–415.

Hack, R. (2000). Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics*, 21(4), 423–448. <https://doi.org/10.1023/A:1006797126800>

Hung, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.

Ivanik, O. (2015). Principles and methods of the regional landslide hazard assessment based on analysis of the rock mass stress-strain state. *Proc. of the 14th EAGE International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412393>

Ivanik, O., Fonseca, J., Shabatura, O., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D. (2022). An integrated approach for landslide hazard assessment: A case study of the Middle Dnieper Basin, Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 52, 81–86. DOI: 10.24425/jwld.2021.139947

Ivanik, O., Menshov, O., Bondar, K., Vyzhva, S., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D., Tustanovska, L. (2022). Integrated approach to modelling and assessing the landslide hazards at the regional and local scale in Kyiv urbanized area, Ukraine. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 5479–5491. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01447-x>

Ivanik, O., Shabatura, O., Hadiatska, K., Chernov, A., Kravchenko, D., Khomenko, R. (2020). Application of geophysical methods for monitoring of landslide hazards: case study from lake Glynka (Kyiv, Ukraine). *Proc. of the Second EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities, 8–11 September*. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055004>

Ivanik, O., Shabatura, O., Homenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D. (2020). Local forecast of landslide hazards: case study from Kyiv region. *Proc. of the Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, May 2020*, Vol. 2020, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo118>

Khomenko, R.V., Bondar, K.M., Popov, S.A. (2013). The shallow multi-electrode device for electrical resistivity measurements. Description and test results. *Proc. of the 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142422>

Loke, M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software.

Ma, Z., Mei, G., Piccialli, F. (2021). Machine learning for landslides prevention: a survey. *Neural Comput & Applic*, 33, 10881–10907. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05529-8>

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62(4), 681–696.

Nohani, E., Moharrami, M., Sharafi, S., Khosravi, K., Pradhan, B., Pham, B.T., Lee, S., Melesse, A.M. (2019). Landslide Susceptibility Mapping Using Different GIS-Based Bivariate Models. *Water*, 11, 1402. <https://doi.org/10.3390/w11071402>

Pan, X., Nakamura, H., Nozaki, T. et al. (2008). A GIS-based landslide hazard assessment by multivariate analysis. *Journal of the Japan Landslide Society*, 45, 3, 187–195.

Patella, D. (1997). Introduction to ground surface self-potential tomography. *Geophysical Prospecting*, 45, 653–681. doi:10.1046/j.1365-2478.1997.430277.x

Reynolds, J.M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 796 p.

- Saha, K., Arora, M.K., Gupta, R.P. et al. (2005). GIS-based route planning in landslide-prone areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 19, 10, 1149–1175.
- Santoso, B., Hasanah, M.U., Setianto. (2019). Landslide investigation using self potential method and electrical resistivity tomography (Pasanggrahan, SouthSumedang, Indonesia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1–9. doi:10.1088/1755-1315/311/1/012068
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990). Applied geophysics. Cambridge University Press, 522 p.
- Wei, Wu. (2015). Recent Advances in Modelling Landslides and Debris Flows. In: Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer Intern. Publishing, IX, 323. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11053-0>
- Whiteley, J.S., Chambers, J.E., Uhlemann, S., Wilkinson, P.B., & Kendall, J.M. (2019). Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. *Reviews of Geophysics*, 57, 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
- Abbaszadeh Shahri, A., Maghsoudi Moud, F. (2021). Landslide susceptibility mapping using hybridized block modular intelligence model. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 80(1), 267–284. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01922-8>
- Bagri, I.D., Blipov, P.V., Gozhik, P.F., Kozhemyakin, V.P. (2004). Activation of hazard geological phenomena in Transcarpathia as result of extreme floods. Kiyv, 210 p. [in Ukrainian]
- Biswakarma, P., Barman, B.K., Joshi, V., Rao, K.S. (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
- Cees, J. Van Westen, (2000). The Modelling Of Landslide Hazards Using Gis. *Surveys in Geophysics*, 21, 2–3, 241–255.
- Daout, S., Parsons, B., Walker, R. (2021). Post-Earthquake Fold Growth Imaged in the Qaidam basin, China, With InSAR. *JGR: Solid Earth*, 126, e2020JB021241. <https://doi.org/10.1029/2020JB021241>
- Demchyshyn, M.G. (1992). Present slopes dynamics of Ukraine territory. Kyiv: Naukova Dumka, 256 p. [in Ukrainian]
- Elmoulat, M., Debauche, O., Mahmoudi, S., Mahmoudi, S.A., Manneback, P., Lebeau, F. (2020). Edge Computing and Artificial Intelligence for Landslides Monitoring. *Procedia Computer Science*, 177, 480–487. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.066>
- Foster, C., Pennington, C.V.L., Culshaw, M.G., 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., Ciampalini, A., Bardi, F. et al. (2018). A method for assessing and managing landslide residual hazard in urban areas. *Landslides*, 15, 183–197. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0875-y>
- Frodella, W., Morelli, S., Gigli, G., Casaghi, N. (2014). Contribution of infrared thermography to the slope instability characterization. *World Landslide Forum 3*, 2–6 June, Beijing, China, 06/2014.
- Garcia-Rodriguez, M.J., Malpica, J.A., Benito, B., Diaz, M. (2008). Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology*, 95, 172–191.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Foltz, R.B., Elliot, W.J. (2006). Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis. *Transaction in GIS*, 10, 395–415.
- Hack, R. (2000). Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics*, 21(4), 423–448. <https://doi.org/10.1023/A:1006797126800>
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.
- Ivanik, O. (2015). Principles and methods of the regional landslide hazard assessment based on analysis of the rock mass stress-strain state. *Proc. of the 14th EAGE International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412393>
- Ivanik, O., Fonseca, J., Shabatura, O., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D. (2022). An integrated approach for landslide hazard assessment: A case study of the Middle Dnieper Basin, Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 52, 81–86. DOI: 10.24425/jwld.2021.139947
- Ivanik, O., Menshov, O., Bondar, K., Vyzhva, S., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D., Tustanovska, L. (2022). Integrated approach to modelling and assessing the landslide hazards at the regional and local scale in Kyiv urbanized area, Ukraine. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 5479–5491. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01447-x>
- Ivanik, O., Shabatura, O., Hadiatska, K., Chernov, A., Kravchenko, D., Khomenko, R. (2020). Application of geophysical methods for monitoring of landslide hazards: case study from lake Glynka (Kyiv, Ukraine). *Proc. of the Second EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities*, 8–11 September, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055004>
- Ivanik, O., Shabatura, O., Homenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko, D. (2020). Local forecast of landslide hazards: case study from Kyiv region. *Proc. of the Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, May 2020*, Vol. 2020, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo118>
- Ivanik, O.M. (2008). Spatial analysis and prediction assessment of water and gravitation processes in the Carpathians region based on GIS. *Geoinformatics*, 4, 52–58. [in Ukrainian]
- Ivanik, O.M., Shevchuk, V.V., Lavrenyuk, M.V. (2020). Modelling of the influence of geological hazard processes on the functioning of natural and techno systems. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Hadiatska, K. (2019). National database of landslide processes: principles of development, implementation and application for landslides 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> [in Ukrainian]
- Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). A new low deep multi-electrode device for measuring electrical resistance. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (61), 36–41. [in Ukrainian]
- Khomenko, R.V., Bondar, K.M., Popov, S.A. (2013). The shallow multi-electrode device for electrical resistivity measurements. Description and test results. *Proc. of the 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142422>
- Koshlyakov, O.E., Ishchuk, O.O., Kryzyska, N.M. (2003). Determination of potential landslide areas of the right bank of the Dniro River in Kyiv by using GIS technology. *Proc. of the IV International Scientific Conference "Geophysical monitoring of Geological Hazard Processes and Ecological Condition of the Environment", October 9–11, Kyiv, Ukraine*. [in Ukrainian]
- Kuzmenko, E.D. (Ed.), Bezsmertnyi, A.F., Vdovina, O.P., Kryvyuk, I.V., Cheban, V.D., Shtogrin, L.V. (2009). Study of landslide processes by geophysical methods. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG Publishing. [in Ukrainian]
- Kuzmenko, E.D., Blinov, P.V., Vdovina, O.P. et al. (Eds.). (2016). Prediction of landslides. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG Publishing. [in Ukrainian]
- Loke, M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software.
- Lysychnenko, G.V., Zabulonov, Yu.L., Khmil, G.A. (2008). Natural, man-made and environmental risks: analysis, assessment, management. Kyiv: Naukova Dumka. [in Ukrainian]
- Ma, Z., Mei, G., Piccialli, F. (2021). Machine learning for landslides prevention: a survey. *Neural Comput. & Applic*, 33, 10881–10907. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05529-8>
- Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62(4), 681–696.
- Nohani, E., Moharrami, M., Sharafi, S., Khosravi, K., Pradhan, B., Pham, B.T., Lee, S., Melesse, A.M. (2019). Landslide Susceptibility Mapping Using Different GIS-Based Bivariate Models. *Water*, 11, 1402. <https://doi.org/10.3390/w11071402>
- Pan, X., Nakamura, H., Nozaki, T. et al. (2008). A GIS-based landslide hazard assessment by multivariate analysis. *Journal of the Japan Landslide Society*, 45, 3, 187–195.
- Patella, D. (1997). Introduction to ground surface self-potential tomography. *Geophysical Prospecting*, 45, 653–681. doi:10.1046/j.1365-2478.1997.430277.x
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 796.
- Saha, K., Arora, M.K., Gupta, R.P. et al. (2005). GIS-based route planning in landslide-prone areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 19, 10, 1149–1175.
- Santoso, B., Hasanah, M.U., Setianto. (2019). Landslide investigation using self potential method and electrical resistivity tomography (Pasanggrahan, SouthSumedang, Indonesia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1–9. doi:10.1088/1755-1315/311/1/012068
- Shpak, V.I. (2020). *National security of Ukraine in the challenges of recent history*. Kyiv: DP "Express-Obiava". [in Ukrainian]
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990). Applied geophysics. Cambridge University Press, 522 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. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (90), 17–20. [in Ukrainian]
- Wei, Wu. (2015). Recent Advances in Modelling Landslides and Debris Flows. In: Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer Intern. Publishing, IX, 323. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11053-0>
- Whiteley, J.S., Chambers, J.E., Uhlemann, S., Wilkinson, P.B., Kendall, J.M. (2019). Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. *Reviews of Geophysics*, 57, 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 14.12.22

O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: ivanik@knu.ua;
V. Shevchuk, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: svgeol44@gmail.com;
D. Kravchenko, PhD (Geol.), Associate Prof.,
E-mail: dmytro.kravchenko@knu.ua;
K. Hadiatska, PhD (Geol.), Assist.,
E-mail: k.hadiatska@knu.ua;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

LANDSLIDE HAZARD PREDICTION AND IMPACT ON COMMUNITY: MAIN APPROACHES, PRINCIPLES AND METHODS

The problem of predicting the landslide hazard is a priority area of research in the field of assessment of risks and natural disasters, which requires a comprehensive in-depth analysis of the factors of landslide formation, as well as the synthesis of existed theoretical and empiric data for a full understanding of the problem of landslide hazard and comprehensive assessment of its impact on community. The presented research is aimed at the development, implementation, and application of a comprehensive methodology for predicting landslide hazards and assessing their impact on the infrastructure. The research was carried out within the framework of national and international projects with the participation of international partners from universities in France, Austria and Great Britain. The methodology of regional landslide hazard prediction for different structural regions of Ukraine is based on the methods of spatial modelling and aims at the landslide susceptibility mapping, creating multifactorial spatial models. As a result of a comprehensive analysis of landslide factors and spatial modelling integrated landslide hazard maps were created. These maps provide an opportunity to comprehensively assess the landslide hazard for different regions. Methods of local prediction of landslide hazard based on the application of a rational complex of geological, physical, remote, thermographic studies, and deterministic modelling enable to identify the main features and potential activity of landslide processes within landslide-prone areas and suggest preventive measures for risk mitigation. Examples of the integrated methodology applications for landslide hazard prediction within model sites in Kaniv and Kyiv regions are given. The concept of informing people about the potential geohazards was given.

Keywords: landslide hazard, slope stability, forecast, deterministic modelling.

UDK 553.98:551.2
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.02>

S. Aliyeva, PhD, Associate Prof.,
E-mail: suaza@mail.ru,
Azerbaijan State of Oil and Industry University,
34 Azadlig Ave., Baku, Azerbaijan

GEODYNAMIC EVOLUTION OF THE CASPIAN MEGADEPRESSION AND ADJACENT TERRITORIES

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

The objective of this study is to establish links between the features of the geodynamic evolution of the complex, heterogeneous in its geological structure of the Caspian megadepression and adjacent regions – with the issues of assessing the prospects for the oil and gas potential of this entire territory.

For this purpose, the data of published works on the geodynamic evolution of the above territory were analyzed and, based on this analysis, a summary map of the geodynamic evolution of the Caspian megadepression and adjacent regions was compiled, combined with the optimal systemic oil and gas geological zoning of this territory, previously developed by the authors of this work. The analysis of oil and gas resources for individual large links of the optimal zoning system with the features of their geodynamic evolution showed that in the studied area, there is mainly a direct dependence of the amount and density of hydrocarbon (HC) resources on the number of stages of geodynamic evolution of the earth's crust that have passed here, and also the presence or absence of paleosubduction zones (island arcs).

Keywords: Caspian mega-depression, Azerbaijan, geodynamics, complex regions, optimal systemic oil and gas geological zoning, hydrocarbon resources, oil and gas potential, organic matter (OM), dispersed organic matter (DOM).

Formulation of the problem. To predict the prospects for oil and gas content in the complex regions of the Caspian megadepression and adjacent territories, one of the important criteria is the analysis of the features of the geodynamic evolution of the earth's crust on this great territory.

In a number of works devoted to this problem (Kucheruk et al. 1983; Sokolov, 1985; Kucheruk et al., 1983) certain regular relationships between oil and gas potential and global tectonics have been identified, in particular, a relationship has been established between the location of elevated hydrocarbon concentrations in areas of high heat flux from the Earth's interior, as well as the relationship of hydrocarbon accumulations with ancient rift (spreading) and subduction (convergent) systems in the earth's crust. Thus, in paleorift systems, favorable conditions for oil and gas formation could be created, since after the split and expansion of the earth's crust, the approaches to the surface of the highly heated mantle substance were created, on the one hand, high heat flows, and on the other hand, large graben-like depressions – sedimentary-rock basins with huge thicknesses of sediments filling them, in which large hydrocarbon deposits can be concentrated.

According to (Kucheruk et al., 1983; Sokolov, 1985; Kucheruk et al., 1983) the most favorable conditions for oil and gas formation and oil and gas accumulation existed on the continental margins – due to the accumulation of thick sedimentary strata and a favorable thermodynamic regime. Modern passive margins were formed at the end of the Paleozoic and in the Mesozoic. In the initial period, these margins experienced rifting, which subsequently gave way to intense subsidence with the accumulation of thick (up to 12-14 km) sedimentary strata. Oil and gas formation in sedimentary strata on the passive margins of the continents was favored by the presence of carbonate and argillaceous oil source strata enriched in organic matter, as well as thick terrigenous and carbonate reservoirs, high geostatic load, which ensures the extraction of formation waters from hydrocarbons and their migration into reservoirs (Kerimov et al., 2016). Within active continental margins characterized by high tectonic activity, seismicity and volcanism, which is due to the presence of deep inclined faults (Benioff zones), along which plates are thrust (subduction zones) there are also very favorable conditions for oil and gas formation and oil and gas accumulation (Kerimov et al., 2014; Kerimov,

2021). In these zones, during the process of subduction, a significant bowing of the earth's crust and the accumulation of huge strata of rocks in the zones of troughs, often immediately in front of mountain structures, also occur. In this case, thick sedimentation prisms are formed in the troughs, in which sediments rich in organic matter accumulate. As the sedimentary rock basins deepen and the thickness of the sediments increases, the geostatic load causes the squeezing of reservoir fluids and the formation of a reservoir pressure gradient towards the mainland, and also contributes, due to the huge lateral pressure, to additional heating of rocks and fluid migration in the lateral and vertical directions (Khaustov, 2011).

Thus, there is an exceptionally powerful mechanism for the generation of hydrocarbons from organic matter drawn along with oceanic sediments into plate underthrust zones.

Analysis of recent research and publications. According to (Gavrilov, 1988) the lithosphere in its development goes through a number of stages and phases, of which the phases of rift, partial and complete subduction (obduction) are the most favorable for oil and gas formation. These phases are characterized by the accumulation of a large mass of sedimentary rocks with dispersed organic matter, high heating of the subsoil, and a number of other indicators favorable for oil and gas formation. The main conclusions, according to (Gavrilov, 1988) arising from the proposed approaches in the field of oil and gas formation, are as follows:

1. The process of oil and gas formation is cyclical, repeating itself with varying degrees of intensity as the lithosphere evolves;

2. The determining factor of oil and gas formation is, first of all, the geodynamic regime of the subsoil, and the most favorable are subduction and riftogenic (Gavrilov, 1988).

The subduction-obduction geodynamic regime is typical for subduction zones located along the margins of the oceans, where peculiar associations usually arise from a deep-sea trench, an accretionary prism, an island arc, and a marine marginal basin, or from a deep-sea trench, an accretionary prism, and an active continental margin. In all cases, the maximum heating of the subsoil is typical of the rear part of the subduction zone. In the underthrust zones, peculiar natural stills appear, where, in a short geological time, the OM is transformed into drop-liquid oil. Thermal fluids (water heated up to 400 degrees and gases under

enormous pressure) will tend to move from under the underthrust zone to an area of lower pressure. On their way, they will inevitably begin to squeeze out, dissolve and carry out drop-liquid oil (*Guliyev et al., 2020*). This powerful source rock micro-oil removal factor provides for efficient displacement and migration of dispersed micro-oil. Thermal waters rising along cracks with hydrocarbons (in free or dissolved state) will be unloaded within the lithospheric ledge and in the rear of the island-arc system with the formation of oil and gas deposits.

Moving away from the underthrust zones, the temperature and pressure of thermal waters decrease, and the filtration rate also slows down. Conditions favorable for the accumulation of hydrocarbons in the deposit are created.

The accumulation of oil and gas under the action of the subduction mechanism reaches its apogee during the period of the final closure of the ocean, when mountain-folded areas are formed in place of the ocean spaces, separated from the continental platforms by forward troughs.

The riftogenic geodynamic regime is inherent in intracontinental or continental marginal rift systems. Rifts and over-rift depressions are filled with a thick layer of sediments (4-7 km), enriched with organic matter. The high heat flow that comes from the hot mantle close to the base of the lithosphere (asthenospheric ledge) activates the processes of processing organic matter into droplet liquid oil. Superheated water-mineral flow coming from the bottom of the lithosphere and consisting of water, hydrogen, helium, carbon dioxide, methane and other components, flushes out liquid and gaseous OM and moves them into the reservoirs of the upper sections of the sedimentary cover (*Murzagaliev, 2011*).

If the processes of rifting are not accompanied by the opening of the ocean, but stop at the rift phase, then large depressions and synclises usually occur above the rift structures. In the axial part of these large areas of subsidence, there are hot seams, a kind of "spiral", which intensely heats up the sediments and stimulates the conversion of OM into oil and gas. Regional zones of oil and gas accumulation of the rift type are formed within the continents.

Thus, rift geodynamic regimes can manifest themselves within continents and be intracontinental, but they can also affect passive continental margins and be, as it were, continental margins.

Expert assessments performed by researchers (*Kucheruk et al., 1985; Sorokhtin et al., 2002; Shein, 2007*) show that in the areas of action of the subduction-obduction geodynamic regime, up to 80 % of all identified reserves of hydrocarbon raw materials were generated, while under the influence of the rift regime, ~15 % of the reserves were formed, and only 5 % was passed to the share of the depression regime.

Thus, as a result of the above studies, the following conclusions can be drawn:

1. The geodynamic model of oil and gas formation in the lithosphere provides for a cyclical flow of the process with its periodic intensification during the most tectonically active epochs: rifting and closing of the oceans.

2. The necessary conditions for the formation of oil are: the presence of a sufficient volume of precipitation with diffuse organic matters (DOM) and a severe thermobaric regime of the subsoil.

3. The overheated water-mineral flow coming from the bottom of the earth's crust serves as the mechanism for the removal of droplet-liquid oil from the foci of formation into reservoir beds.

4. The formation of oil and gas deposits in reservoirs occurs according to the traditional scheme.

Such a geodynamic model of oil and gas formation, in our opinion, is sufficiently substantiated, confirmed by the world practice of prospecting and exploration for oil and gas, and can be taken as the basis for determining the degree of prospects of regions, depending on the number of stages of the geodynamic cycle that took place on the territory of these regions (*Aliyeva, 2016*).

Each stage of the evolution of the lithosphere corresponds to well-defined tectonic types of sedimentary basins, the formation of which is determined by the geotectonic (extension, compression, "passive" subsidence) and thermal regimes prevailing at this stage.

This, in turn, determines the geological parameters characteristic of this type of basins – the type of crust, the rate of subsidence and sedimentation, the lithofacies character and thickness of sedimentary fulfillment, geothermal gradients, nature of deformations and types of traps, conditions for the accumulation, burial and transformation of OM, types of oil and gas source rocks, reservoirs and seals, the scale of generation and migration routes of hydrocarbons, the location and nature of regional zones of oil and gas accumulation (*Mamedov, 2009*).

Most of the existing sedimentary oil and gas basins have gone through several stages of geodynamic development. Usually, during the transition from one stage to another, in place of the former sedimentary basin, a new one arises – of a different tectonic type, with its own structural features, thermobaric conditions, etc. Vertical overlap and/or lateral conjugation of sedimentary basins (or their parts) corresponding to successive stages of evolution lead to the formation of the resulting sedimentary basin with a much more complex geological structure. In the section of such basins, relics of various previous stages form independent structural stages. The basins of the most complex structure and long evolution turn out to be the most highly productive in terms of hydrocarbons (HC) (*Guliyev et al., 2009; Feyzullaev et al., 2016*). Each stage contributes to the total hydrocarbon potential of the resulting basin. Obviously, the last stage of evolution has a decisive influence on the structure and features of hydrocarbon distribution in any modern sedimentary basin. However, in the lower structural levels, corresponding to the basins (or parts thereof) of the previous stages, the oil and gas content typical for this type of sedimentary-rock basin can be preserved to a large extent. When the structural plan is restructured, to a greater or lesser extent, the ancient accumulations of hydrocarbons are reformed, moreover, the deposits of the upper structural stage receive significant portions of hydrocarbons from the lower (lower) ones both due to the destruction of the deposits available there, and as a result of additional generation of hydrocarbons in the lower parts of the section, which found themselves in new thermobaric conditions. Most of the giant – the largest oil and gas fields are confined to the basins of passive continental margins (the Tethys global belt of oil and gas accumulation), supra-rift depressions (the Laurasian global belt of oil and gas accumulation) (*Lebedko, 2013*). Smaller deposits are confined to the Gondwana and Pacific global belts of oil and gas accumulation, where basins of active continental paleomargins, orogens of plate collision, prevail.

Analysis of the distribution of hydrocarbon resources of the world, formed in different geodynamic settings, carried out by the US Geological Survey (*Ulmishek et al., 2004*), showed that the basins of passive continental paleomargins have the greatest resources. They contain 68 % of the world's oil resources and 49 % of gas. The second most important are the basins of rifts and supra-rift depressions,

where 22 % of oil and 44 % of gas are concentrated. The basins of active continental margins and island arcs contain 4 % of oil and 3 % of gas resources, while the basins of plate collision orogens contain 6 % of oil and 4 % of gas.

The largest accumulations of hydrocarbons in the world are concentrated within long-term (more than 300 million years) passive margins, for example, Persian, Alaska, etc., transformed by the collision of plates in the Cretaceous-Cenozoic stage of development (*Kerimov et al., 2010*).

Thus, from the point of view of global lithospheric plate tectonics, high oil and gas potentials are associated primarily with continental margins, paleorift basins, zones of hidden foredeeps formed during the final stage of plate collision, as well as with thrust margins of folded mountain structures.

Isolation of previously unsolved parts of the general problem. Based on the foregoing, in order to predict the oil and gas potential of sedimentary basins, it is necessary first of all to study, along with the geotectonic regime, the geodynamic conditions of their formation, on the basis of which they should be appropriately typified and the territory be zoned. It is the approach that we have taken as the basis for studying the geological structure and prospects for the oil and gas potential of the Caspian Basin and adjacent regions.

It is well known that the Caspian Sea in its modern outlines, including the Caspian depression framing it in the north, is a submeridional heterogeneous megatrough or megabasin. This megatrough, referred by many researchers to the type of superimposed troughs, covers significantly different in structure and geological development, consequently, according to the geodynamic conditions of the formation of geostructural elements of classical platform and folded territories (*Tulegenova et al., 2016*).

In paleogeodynamic terms, the region of the Caspian megatrough is considered as a node of interaction, on the one hand, – the paleoceanic systems of the Urals and Tethys, and, on the other hand, the paleo-continental and microcontinental systems of Europe, Arabia and the Asia Minor-Iranian "wedge".

According to (*Murzagaliyev, 1998*), from the standpoint of the modern plate tectonic model, the presence of East European, Scythian, West Turanian, Lesser Caucasian (Transcaucasian), South Caspian and Iranian lithospheric mesoplates is recognized within the region under consideration. Sutures of different ages are confined to their boundaries – fragments of the continental or suboceanic crust, which were affected by subduction and collision during the closing of the Tethys paleocean. Since the late Miocene time, the East European Plate has been considered to be inactive. The Scythian and Lesser Caucasian plates move along an azimuth of 18° at a speed of 1.92 cm/year and simultaneously rotate counterclockwise by 2.03-10-7° (*Zonenshain et al., 1990*) West Turanian and the Iranian mesoplates move to the northwest along the collision seams at a speed of 1.7 cm/year, and the South Caspian plate is displaced along an azimuth of 319° at a speed of 0.4 cm/year. Relative to the East European Plate, it rotates at an angular velocity of 0.6 cm/year, 10-7° counterclockwise. Thus, the Caspian region found itself in the center of convergence of several plates with different kinematic parameters. All this caused the complexity of the geodynamic development and conjugation of geostructural elements of different types in this megatrough.

According to research (*Sokolov, 1985; Murzagaliyev, 1998; Brazhnikov et al., 1987; Zonenshain et al., 1984; Ishutin, 1988; Maximov et al., 1987; Khalilov et al., 1991*), in the structure of the northern part of the Caspian subsidence area, a number of differently directed and different-aged rift

systems were identified, which served as the basis for the development of various geodynamic models. According to the geodynamic model (*Brazhnikova et al., 1987*), in the Riphean-Vendian, after the breakup of Megagea, the microcontinents of the Ustyurt Plateau and the Karpinsky Swell began to separate from the East European continent, with which they previously formed a single whole. In the Cambrian, Ordovician, and Silurian, these microcontinents continued to separate from the mainland with the formation of the vast Paleo-Asian Ocean, which merged with the Paleo-Tethys Ocean 1, moreover, the territory of the Northern Caspian at that time was geographically located in the southern hemisphere, near the equator. In the Devonian, Carboniferous and Permian, the Paleo-Asian Ocean was compressed, the Ustyurt Plateau and the microcontinent of the Karpinsky Swell were pushed back towards the East European continent, however, not to their original, but to their current position. As a result of the pushing of the basaltic oceanic crust in the direction from north to south, from the side of the central part of the Caspian basin, the Devonian Biikzhal was formed – the North Astrakhan island arc in the south of the Caspian basin (Fig. 1), which actually, starting from the Devonian, divided the Caspian Basin into two sub-basins – the Central Caspian and the North Caspian. The deep-water trough in the North Caspian sub-basin was located at the site of the modern Tugarakchan trough and the Karakul-Zheltau dislocation zone. Later, starting from the end of the Early Permian-Triassic, the North Caspian and Central Caspian sub-basins again become a single sedimentation basin. Significant influence on the development of the North Caspian Basin was also exerted by submeridional oriented ancient rift systems (Ural, Mezen-Caspian, etc.).

In the work (*Murzagaliyev, 1998*), collisional, subduction, inversion, nappe-thrust, retrothrust and riftogenic structures were identified according to the most characteristic features of geophysical fields within the Caspian megadepression.

The South Emba paleorift, located within the North Caspian of the East European Precambrian platform, was formed in the Riphean-Vendian (Fig. 1). Morphologically limited by deep faults of the spall type. The roof of the Precambrian basement is lowered along the faults to a depth of 12–13 km. The early Hercynian stage of tectogenesis led to the opening of the rift and the accumulation of Devonian-Carboniferous deposits 7–10 km thick. In the Early Permian, as a result of the collision and collision of the East European and West Turanian mesoplates, the rift zone was formed into an inversion uplift. On the surface of Mohorovichich at a depth of 34–36 km, the North Caspian uplift is distinguished, which does not exclude the intrusion of a mantle diapir along weakened zones. The heat flux density values are 58 mW/m². The thickness of the earth's crust is reduced to 10–16 km.

In the evolutionary aspect, based on the accepted geodynamic model of the development of the North Caspian region in the Late Paleozoic (*Brazhnikov et al., 1987*), when a closed sub-basin existed here, it can be attributed according to the classification (*Kucheruk et al., 1983*) to subduction back-arc (or inter-arc) sedimentary basins, and since the Upper Permian-Triassic, when there was already a single Caspian basin, it should be classified as an intracontinental megabasin or a pericontinental-oceanic type of sedimentary basin. According to the classification (*Sokolov, 1985*), in the evolutionary and tectonic aspect, the Caspian depression, including its water area, in the final stage of its development, it most fully corresponds to the superimposed syncline type of marginal platform basins. Since the basin floor contains

traces of ancient rifts and rift-like structures, and its southern framing is represented by the Pripyat-North-Caspian suture zone, from geodynamic positions, it can be considered in accordance with the classification of Bally A.U. (Kucheruk *et al.*, 1983) as a pericratonic basin on earlier rift systems, which were subsequently partially regenerated or rebuilt.

(Zonenshain *et al.*, 1985) believe that the Caspian Basin, in general, can be interpreted as a residual oceanic basin of pre-Devonian age, of the same type as the modern Gulf of Mexico. Its bed in the central part of the basin was swallowed up in deep-sea trenches and turned out to be buried under a layer of sediments.

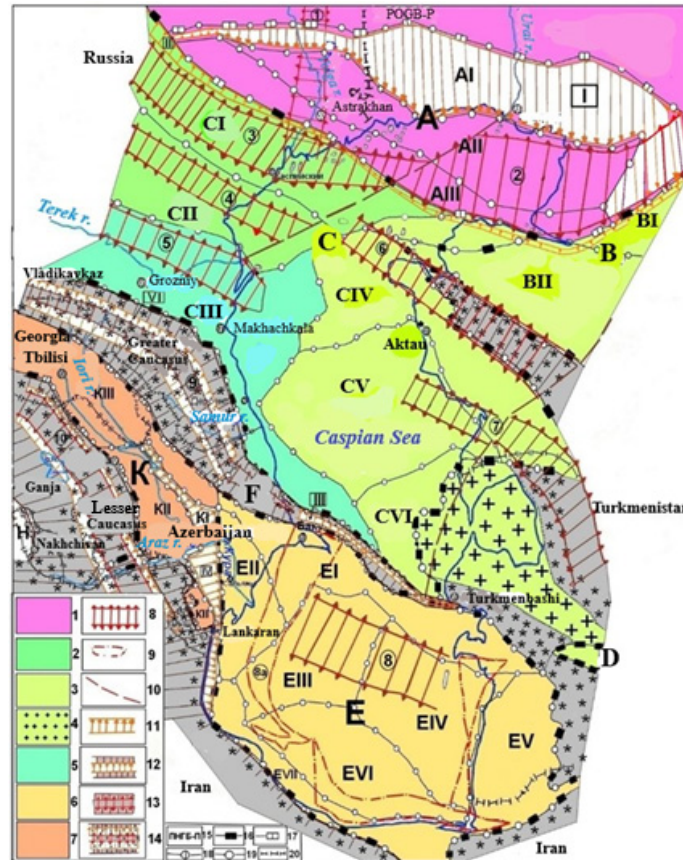


Fig. 1. Combined maps of geodynamic evolution, systemic oil and gas geological zoning of the Caspian megadepression and adjacent regions

Legend: 1 – Southern part of the East European Platform (basement age – Archean-Proterozoic); 2 – Southeastern part of the Scythian Plate (basement age – Paleozoic); 3 – Northwestern part of the Turan Plate (basement age – Paleozoic); 4 – Arch of the Turan plate; 5 – Advanced (piedmont) trough of the Scythian-Turan plate; 6 – South Caspian Plate (basement age – Upper Paleozoic – Lower Mesozoic); 7 – Lesser Caucasian (Transcaucasian) plate (basement age – Middle Paleozoic – Triassic); 8 – Paleorift (spreading) zones (numbers in circles) (1 – Mezen-Caspian; 2 – South Embian; 3 – ridge Karpinsky; 4 – Eastern-Manych; 5 – Tersko-Caspian; 6 – Central Mangyshlak; 7 – Tuarkyr-Karaudinsk; 8-South Caspian); 9 – proposed Cenozoic-modern rift zone; 10 – Transform faults; 11 – Paleosubduction (island-arc) zones (Roman numerals in rectangles) (I – Biikzhal – North Astrakhan; II – Karpinsky ridge – North-Buzachinskaya; III – North Absheron; IV – Pre-Talysh – Mingachevir; V – Lesser Caucasian; VI – Greater Caucasus); 12 – zones past the geodynamic stages of subduction and collision; 13 – zones past the geodynamic stages of spreading and collision; 14 – zones past the geodynamic stages of spreading, subduction, collision and orogeny, with intense folding and metamorphism of the sedimentary cover; 15 – Pre-Caspian oil and gas basin-province (POGB-P); 16 – boundaries of oil and gas basins – provinces (NGB-P); 17 – boundaries of oil and gas bearing sub-provinces (OGSP); 18 – boundaries of oil and gas bearing independent regions (OGIR); 19 – boundaries of oil and gas bearing regions (OGR); 20 – state borders.

Systematic oil and gas geological zoning of the Caspian megadepression and adjacent regions (the largest parts of the zoning system are given): **A** – the southern marginal part of the Caspian megasyncline, the North Caspian OGSP: AI – the eastern part of the buried Biikzhal-North Astrakhan island-arc system – the Emba OGR, AII – the Zavolzhsk-Tugarakchan depression region (Astrakhan-Primorsk OGR), AIII – the transitional cover-thrust area (Karakul-Zheltau NGR); **B** – **Aral-Ustyurt syncline (NGB-P)**: BI – Mynsualmas gas-bearing region (GR), BII – Ustyurt oil and gas region (OGR); **C** – **Scythian-Turanian epihercynian plate and its advanced (piedmont) troughs (North Caucasian-Mangyshlakskaia NGB-P)**: CI – Karpinsky ridge (South Kalmyk OGR), CII – East Pre-Caucasian tectonic region (East Pre-Caucasian OGR), CIII – Terek-Caspian advanced (piedmont) trough (Tersko-Caspian oil and gas basin), CIV – Mangyshlak OGR, CV – Central-Middle Caspian OGR, CVI – West- Karabogaz POGR; **D** – **Amudarya NGB-P**; **F** – **Axial zone SE of the subsidence of the meganticlinorium of the Greater Caucasus (independent Dibrar oil and gas region – IOGR)**; **E** – **South Caspian megadepression (South Caspian OGB-P)**: EI – northwestern side and side tectonic regions of the South Caspian depression – Gobystan-Absheron OGR, EII – Southwestern side and side tectonic areas of the South Caucasus (Lower-Kura-Enzeli OGR), EIII – South Caspian deep-sea basin (Central-South-Caspian POGR), EIV – Turkmen tectonic step (POGR of the Turkmen step), EV – West Turkmen OGR, EVI – Pre-Elburs trough (Pre-Elburs POGR), EVII – Mazandaran POGR; **K** – **Middle Kura-Kartli depression – South-East part of the Transcaucasian intermountain trough (Middle Kura-Kartli OGSP of the Transcaucasian OGB-P)**: KI – Axial zone of the Pre-Talysh-Mingachaur buried island-arc system (cid-Talysh-Mingachaur unpromising region), KII – Yevlakh-Agdzhabedi trough (Yevlakh-Agdzhabedi OGR), KIII – Iori – Adzhinour trough (Iori-Adzhinour OGR); **H** – **Nakhichevan superimposed trough (Nakhichevan PNGSR)**

In the Late Devonian-Early Carboniferous, due to the expansion of transgression for most of the pericontinental margin, the carbonate type of sedimentation becomes predominant with the formation of shallow-marine layered carbonate, terrigenous-carbonate and basin formations confined to the inner regions of the North Caspian sub-basin.

The carbonate stage of Carboniferous sedimentation was most clearly manifested in the Late Visean-Early Bashkirian period, causing the formation of a carbonate shallow-water layered formation in a significant part of the margin of the North Caspian sub-basin. This stage is characterized by a rather clear expression of the carbonate shelf with the development of a reef subformation on its edge (Khalilov *et al.*, 1991).

Within the southern part of the Northern Caspian, already on the Scythian plate, the initiation of the **Karpinsky ridge rift** is associated with the Riphean stage. According to the basement, the rift structure consists of blocks of different sizes, stepwise submerging up to 13–15 km. In the water area of the Northern Caspian, an intense positive anomaly is shifting to the north, which reflects the horizontal shift of the rift along the transform slip sutures. The intrusion of small massifs and dikes of alkaline ultramafic rocks was found in the Devonian deposits, which indicates the regeneration of the rift and extension of its bed along listric faults that served as magma conduits. The late Hercynian stage of tectogenesis is marked by the collision of the Scythian microcontinent with the passive margin of the Pre-Caspian continent. The further complication of geodynamic conditions led to the formation of zones of cover-thrust dislocations of the Karpinsky Ridge, under which the Paleozoic platform deposits of the Pre-Caspian Basin were buried.

Within the middle part of the Caspian depression at the turn of the late and early Mesozoic within the Scythian plate, weak extension continued, which did not reach the complete rupture of the earth's crust. Further evolution of rifting led to the formation of the East Manych and Terek-Caspian rifts (Fig. 1).

The rift zone is filled with terrigenous-carbonate and volcanogenic sediments of the Permian-Triassic, overlain with an angular unconformity by the Jurassic-Anthropogenic complex of the sedimentary cover.

The East Manych rift is about 150 km long and 60 km wide in the east. The foundation structure is expressed as a block structure with elements of thrust dislocations. The East Manych rift within the water area, apparently, is reduced, which is associated with the influence of transverse slip zones. In the rift area, the thickness of the earth's crust is about 32 km. The temperature on the Mohorovichich surface is 650°C, and the heat flux density is estimated at 55–60 mW/m².

The Terek-Caspian rift arose in the junction zone of the Scythian plate with the region of the Alpine folded structure of the Caucasus. The basement, lying at a depth of 12 km, is composed of dislocated and metamorphosed volcanic strata intruded by magmatic intrusions. Sedimentary complexes are filled with Jurassic-Anthropogenic deposits. In the Neogene-Quaternary, due to tangential compression in the Alpine belt, the Terek-Caspian rift experienced an inversion, which led to the formation of rootless folds of the Terek-Sunzhensky anticlinorium and the East Caucasian thrust belt. The eastern branch of the thrust belt is the Dagestan wedge, characterized by the development of thrusts and retrothrusts at different stratigraphic levels (Makarova and Sukhanova, 2017).

In the structure of the base of the earth's crust, the rift is reflected by a large mantle uplift revealed at a depth of about 45 km, and in the structure of the sedimentary cover, by elements of the inversion-slip type. The thickness of the

earth's crust is 32–35 km. The temperature at the base of the crust is about 600 °C. The heat flux density is relatively low (35–50 mW/m²), which is due to the underthrusting of the Greater Caucasus continental crust under the Scythian plate.

In the geodynamic aspect, in the west of the Turan Epipaleozoic Plate, the formation of the continental crust ended in the pre-Riphean time (Milanovsky, 1987). In the Riphean-Vendian, tectonomagmatic activation of the asthenosphere and upper mantle occurred with the manifestation of scattered rifting. According to modern mobilistic views, the Central Mangyshlak and Tuarkyr-Karaaudan rift systems were localized in the Early Paleozoic. The rift regime (Carboniferous-Permian) was associated with tectonic thinning and partial disintegration of the continental crust. The thickness of the granite layer within the rift zone is reduced to 9–10 km, while in the adjacent areas it is 15–18 km (Dimakov, 1973).

In the Late Permian and Early Triassic, the Earth's crust experienced slight extension, and flyschoid formations accumulated in rift zones. In the early Cimmerian epoch of tectogenesis, the microcontinents of Iran and Western Turan collided. The tangential compression force caused the formation of an inversion uplift in the zone of the Central Mangyshlak paleorift, which, having experienced collision and inversion, was transformed into an underdeveloped paleorift. This process completed the complete consolidation of the folded basement of the West Turan Plate, followed by the post-rift development regime.

The South Caspian rift in the area of Alpine folding was formed due to Mesozoic-Eocene divergence, Oligocene-Early Pliocene collision and Lower Pliocene-Anthropogenic isostasy of small plates. Mesozoic-Eocene extension, caused by the destruction of the crust due to the rise of the mantle diapir, caused thinning, rupture of the granite-metamorphic layer and intrusion of the substance of the basalt layer and mantle.

Mesozoic rifting is confirmed by the results of quantitative calculations of the depths of the upper edges of magnetically active bodies (Murzagaliev, 1998). In the Oligocene-Early Pliocene time of the collision of the Arabian ledge with the Lesser Caucasus plate, general compression begins. As a result of these processes in the Oligocene and Neogene there was a complete overlap of the South Caspian basin. Horizontal forces were transformed into vertical movements, as a result of which mountain structures were formed on the site of the Greater Caucasus and the South Caspian depression ceased to exist as an interarc basin and turned into an intermountain molasse trough (Zonenshain *et al.*, 1990; Milanovsky, 1983, 1987).

In the Lower Pliocene-Anthropogenic time of isostasy, the expansion of the depression intensified. The region of the greatest thickness of sedimentary deposits (up to 25 km) coincides with the high position of the Mohorovichich surface. Of these, about 10–12 km falls on the Pliocene-Quaternary.

In the late Alpine stage, the development of the rift took place already against the background of submeridional compression, which led to the development of linear folds and reverse thrust formation at the boundary of interacting plates. This is the Apsheron-Pre-Balkhan tectonic zone with a series of local uplifts complicated by overthrusts.

The surface of Mohorovichich, framed by a rift, lies at a depth of 40–45 km, and in the center 30–32 km, outlining a large mantle uplift. The surface of the asthenosphere on the MTS materials is expressed as a highly conductive layer, the depth of which under the rift is 40–50 km, and along the periphery it plunges to 100–120 km. The heat flux density is relatively increased – 60–70 mW/m².

According to (*Glumov et al., 2004*), from the point of view of modern geodynamics, the South Caspian rift system is possibly associated with the West Caspian system, forming together with it a "multi-beam" (in plan) complex of structures of the secondary (latent) rifting occurring in the late Cenozoic at the level of the consolidated crust below the sedimentary cover. The development of this process here is evidenced by the zones of deep subsidence of the basement, which in some basins lies at depths of 20–24 km or more, significant thicknesses (5–8 km) of Neogene-Quaternary deposits, the presence of "hot" spots along these zones, increased rates of modern subsidence of the marine bottom and, in some places, adjacent land areas.

The secondary nature of the process is determined by the fact that it occurs against the background of the prevailing transverse compression and orogeny of the Alpine region. The emergence of sliding structures in this case is due not so much to deep subcrustal processes as to a complex wedging effect on the earth's crust of the South Caspian from the Iranian blocks of Deshte-Kevir and Lut and vertical compression, and, consequently, horizontal stretching, of the earth's crust of the era region between a thick sedimentary cover from above and elevated to a depth of 28–25 km by the upper mantle – from below.

On the other hand, the South Caspian system itself, apparently, is a segment of an older Mesozoic-Eocene sublatitudinal intercontinental rift belt, which in the west also included the rift zones of Transcaucasia, the southern and eastern parts of the Black Sea (*Murzagaliev, 1997*).

Based on the foregoing, the united "South-West-Caspian" system, in fact, should be considered as an inherited – superimposed formation, which includes in its structure both the latest sub-meridional expansions and partially regenerated fragments of sub-latitudinal rifts.

Thus, in terms of their geological and geophysical nature, the considered rifts are the results of intracontinental rifting.

The rift stage in the Caspian region proceeded asynchronously. The stages of evolution migrated in time and space: from the Riphean-Vendian on the East European platform to the early Mesozoic on the Scythian plate.

In the process of geodynamic evolution of the region, two large subduction zones were formed: the North – Absheron and the Karpinsky Ridge – North Buzachi. The subduction of the South Caspian Plate beneath the Scythian-Turanian Plate was studied and confirmed by (*Khalilov et al., 1987*) based on complex interpretation of DSS data and earthquake hypocenter depths projected onto the profile line.

According to (*Akhmedbeyli et al., 2002; Bayramov et al., 1998; Ismail-zade, 2005, 2017; Kangerli, 1999*) for the adjacent territory of the Republic of Azerbaijan located in the southwestern part of the region under study, the geodynamic history of development can only be reconstructed from the Late Paleozoic.

The absence of Precambrian-Lower Paleozoic deposits of the epicontinental shelf in the geological section in this territory indicates that it entered the Caucasian-Caspian shield of the Gondwana megacontinent in the Early Paleozoic. Throughout the entire Hercynian stage, the zones of the South Caucasus and the South Azerbaijan segment of the Central Iranian microplate were geostructures of the passive continental margin of Gondwana with independent development regimes, separated by an emerging rift zone, which later became the Lesser Caucasian branch of the Mesotethys Ocean.

At the end of the Hercynian cycle of tectogenesis (Carboniferous-Early Triassic), the South Azerbaijan

segment represented the Atlantic-type passive continental margin of Gondwana, where terrigenous-carbonate strata, sterile in relation to magmatism, accumulated.

At the Alpine stage of the formation of the territory under consideration, according to the data (*Moshashvili, 1982*), three stages are distinguished: oceanic, transitional and continental (neotectonic).

Oceanic stage (Leyas-Aalen). The initial stage of Alpine tectogenesis (the boundary of the Triassic and Jurassic) was marked by intense extension.

During the Lias-Aalen, as a result of the pulling apart of the North and South Caucasian microplates, an extensive sedimentary basin of the marginal sea type with an axial rift basin with a suboceanic crust was formed in the place of the Greater Caucasus, where outpourings of calc-alkaline basalt-andesite-dacite-rhyolitic magmas, series and the introduction of small intrusions of gabbro-diorite composition occurred.

Transitional stage (Late Aalen-Oligocene). The transitional stage in the Caucasus is divided into two epochs: the pre-collision epoch of the origin and development of island arcs, which lasted until the middle Cretaceous, and the collisional epoch of the closure of ocean basins and the collision of continental plates.

Along the southern boundary of the South Caucasian microplate, shearing occurred along the junction of the continental and oceanic crust, and a mode of convergent interaction of this plate with the oceanic lithosphere subducting under it was formed, which persisted for 90 Ma until the Early Senonian. According to (*Moshashvili, 1982*), the Saatly-Kurdamiir island-arc system of uplifts was formed within the middle part of the Kura depression in the Early Jurassic – Senonian.

The Bayos-Bathian period of compression is characterized by a significant restructuring of the structural plan. The central and southern parts of the South Caucasian microplate, covered in the Baiosian-Bathonian period by a shallow sea, became the scene of powerful calc-alkaline island-arc volcanism of basalt-rhyolitic (Bajocian) and basalt-andesite-dacite-rhyolitic (Bathonian) series. The Lesser Caucasian oceanic basin continued to expand during this period.

The paleotectonic setting in the eastern part of the South Caucasian microplate (region of the South Caspian) during this period was characterized by the presence in its central part of a large uplift – a denudation area, bordered in the north and south by deep-sea troughs. The northern and southern shallow waters were separated by bands of barrier reefs from the deep-water basin, which was reborn into a flysch sedimentation basin with the intrusion of small gabbro and plagiogranite intrusions.

Reef limestones also developed along the southern edge of the South Caucasian microplate in the Late Jurassic, and subduction calc-alkaline volcanism continued in a weak form (similar in composition to basalt-andesite-dacitic volcanism in the central part of the microplate), the maximum of which occurred in the Kimmeridgian time.

The subduction process was accompanied in the Early Cretaceous by andesite-basalt magmatism in the front and the intrusion of numerous granitoid intrusions of gabbro-tonalite and gabbro-granite series in the rear of the Jurassic volcanic arc of the Lesser Caucasus under conditions of carbonate sedimentation.

The next structural restructuring – the Austrian phase of tectogenesis falls on the boundary of the Early-Late Cretaceous, when the first signs of general compression that appeared marked the beginning of the collision epoch.

Island-arc volcanism continued on the territory of the South Caucasian microplate in the Albian-Cenomanian and Early Neonian times.

In the rear of the northeastern volcanic belt (Talysh), at the end of the Cretaceous-beginning of the Paleogene, the formation of the marginal basin of the South Caspian continued.

As a result of late Eocene-Oligocene diastrophism (Pyrenean phase) with inversion of geodynamic conditions, the main structures of the Lesser Caucasus were created.

The transition from the Cretaceous to the Paleogene is marked by the shallowing of the Greater Caucasus basin, and in the subsequent segment of the transitional stage of development, weak and moderate downward movements occurred.

Continental stage (late Miocene-Quaternary). Since the Late Miocene, the region enters a new stage of development – neotectonic, when modern geological structures and relief are formed, megastructures of the Greater and Lesser Caucasus, the Kura and Caspian depressions are isolated.

In the Lesser Caucasus, mountain building was accompanied by active terrestrial volcanism and the formation of volcano-plutonic complexes in the Miocene-Early Pliocene and Late Pliocene-Quaternary.

Simultaneously with the formation of the orogens of the Greater and Lesser Caucasus and Talysh, the depression zones, the Kura and South Caspian, subsided.

Conclusions. Based on all the above data on the geodynamic evolution of the earth's crust within the Caspian megadepression and the adjacent territory of Azerbaijan, a combined map of the geodynamic evolution of the above territory was compiled, which shows paleoriftogenic zones, subduction zones, collisions and orogeny, as well as large links of the optimal system of oil and gas geological zoning developed by the authors of this work.

The obtained results of the above studies make it possible to recommend the obligatory use of the analysis of geodynamic evolutions of the earth's crust as an important criterion in assessing the prospects for the oil and gas potential of large complex regions.

References

- Ahmedbeyli, F.S., Ismail-zade, A.D., Kengerli, T.N. (2002). Geodynamics of the Eastern Caucasus in the Alpine tectonic-magmatic cycle (Azerbaijan). *Proceedings of the Institute of Geology of the National Academy of Sciences of Azerbaijan*, 30, 36–48. [in Russian]
- Alieva, S.A. (2016). Features of the geodynamic evolution of the Caspian megadepression and adjacent territories in connection with the assessment of the prospects for oil and gas. In: The fundamental basis of innovative technologies for prospecting, exploration and development of oil and gas fields and priority areas for the development of the resource base of the Russian fuel and energy complex, pp. 5–9. [in Russian]
- Averbukh, B.M., Alieva, S.A. (2006). Industrial oil and gas potential of the North Caspian shelf. *Geology of oil and gas*, (1), 18–24. [in Russian]
- Averbukh, B.M., Alieva, S.A. (2013). Systemic oil and gas geological zoning of the Caspian megadepression and adjacent territories. In Bakirov eds. pp. 13–14. [in Russian]
- Averbukh, B.M., Babaev, R.Ya. (1980). Prospects for prospecting for deposits of the lithological-stratigraphic type in the junction zone of the Kurdamiro-Saatly buried ledge and the Nizhnekurinsky depression. *Azerbaijan Oil Industry*, 1, 23–28. [in Russian]
- Bayramov, A.A., Baba-zade, V.M., Akhundov, R.A. (1998). Geodynamic features of the placement of mineral deposits in the Azerbaijan Republic and the adjacent water areas of the Caspian Sea. *Vestnik Bakin. un-ta, a series of natural sciences*, 1, 86–95. [in Russian]
- Brazhnikov, O.G., Mikhalkova, V.N. (1987). Geodynamics and oil and gas potential of the Caspian basin. Oil and gas potential of the Caspian depression and adjacent areas. Moscow: Nauka, 141–147. [in Russian]
- Feizullaev, A.A., Kadirov, F.A., Kadirov, A.G. (2016). Tectonic-geophysical model of the South Caspian in connection with oil and gas potential. *Physics of the Earth*, 6, 129–138. [in Russian]
- Gavrilov, V.P. (1988). Geodynamic model of oil and gas formation in the lithosphere. *Geology of oil and gas*, 10, 1–8. [in Russian]
- Glumov, I.F., Malovitsky, Ya.P., Novikov, A.A., Senin, B.V. (2004). Regional geology and oil and gas potential of the Caspian Sea. [in Russian]
- Guliev, I.S., Alieva, S.A., Kerimov, V.Yu., Mustaev, R.N. (2020). Hydrocarbon systems and prospects for prospecting for oil and gas accumulations in the North and Middle Caspian. *Mining Journal*, 8, 62–67. [in Russian]
- Guliev, I.S., Fedorov, D.L., Kulakov, S.I. (2009). Oil and gas potential of the Caspian region. "Nafta-Press". [in Russian]
- Ishutin, V.V. (1988). Mezen-Caspian rift system and its structural position in the eastern part of the Russian plate. *Geotectonics*, 5, 34–46. [in Russian]
- Ismail-zade, A.D. (2005). Geology of Azerbaijan. Vol. IV. Tectonics. [in Russian]
- Ismail-Zadeh, A.D. (2017). A new look at the formation of the South Caspian oil and gas basin in the aspect: mantle diapirism-transformation of endogenous hydrocarbon fluid. *Quality management in the oil and gas industry*, 1, 54–58. [in Russian]
- Kangerli, T.N. (1999). Features of the geodynamic development of the Greater Caucasus in the Alpine tectonic-magmatic cycle (on the example of Azerbaijan). *Abstracts of the International Conf. Geodynamics of the Black Sea-Caspian segment of the Alpine fold belt and prospects for prospecting for minerals*, Baku: Nafta-Press, 98–99. [in Russian]
- Kerimov, I.A. (2021). Gravity anomalies, fault tectonics and seismicity of the Terek-Caspian trough. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 11(4), 30–42. [in Russian]
- Kerimov, I.A., Gaisumov, M.Ya. (2014). Modern geodynamics and seismicity of the Terek-Caspian trough. *Geology and geophysics of the South of Russia*, 3, 71–84. [in Russian]
- Kerimov, V.Yu., Rachinsky, M.Z. (2016). Geofluid dynamic concept of hydrocarbon accumulation in natural reservoirs. *Reports of the Academy of Sciences*, 2(471), 187–190. Federal State Budgetary Institution "Russian Academy of Sciences". [in Russian]
- Khalilov, E.A., Averbukh, B.M., Mamedova, V.A., Huseynov, G.M. (1991). Geodynamic and paleogeographic conditions for the formation of regional and gas-bearing formations of the Paleozoic of the Northern Caspian. Geological and geochemical studies in the search, exploration and development of hydrocarbon deposits. Baku: *Thematic collection of scientific works of AzIU*. [in Russian]
- Khaustov, V.V. (2011). Features of the fluid-dynamic system of the South Caspian depression. *Proceedings of the Southwestern State University*, 1, 150a–158. [in Russian]
- Kucheruk, E.V., Alieva, E.R. (1983). Evolutionary classification of sedimentary basins from the standpoint of plate tectonics is the basis for assessing their oil and gas potential. *The collection of VIEMS: "Geological methods of prospecting and exploration of oil and gas fields"*, Moscow, 4. [in Russian]
- Kucheruk, E.V., Alieva, E.R. (1983). The current state of the classification of sedimentary oil and gas basins. Overview information. Oil and gas geology and geophysics. Moscow: VNIIOENG, 88. [in Russian]
- Kucheruk, E.V., Ushakov, S.A. (1985). Plate tectonics and oil and gas potential. *Itogi nauki i tekhniki. Physics of the Earth*. Vol. 8. [in Russian]
- Makarova, N.V., Sukhanova, T.V. (2017). Actual problems of studying the latest platform structures (on the example of the East European Platform and the adjacent part of the Scythian Plate). *Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology*, 3, 17–26. [in Russian]
- Maksimov, S.P., Goncharenko, B.D., Dickenstein, G.Kh. (1987) Regime of tectonic development and oil and gas potential (on the example of the Pripyat-North-Caspian lineament). *Geology of oil and gas*, 12. [in Russian]
- Mamedov, P.Z. (2009). Tectonotypes of the paleobasins of the Caucasus-Caspian region and the main stages of the evolutionary development of the South Caspian megabasin. *ANAN, Baku*, 134–147. [in Russian]
- Milanovsky, E. E. (1987). Rifting in the history of the Earth: Rifting in mobile belts. Bosom. [in Russian]
- Milanovsky, E.E. (1983). Rifting in the history of the Earth: Rifting on ancient platforms. Bosom. [in Russian]
- Moshashvili, A.B. (1982). Evolution of the Earth's crust in the Kura depression and its connection with the Paleo-Tethys problem. Problems of geodynamics of the Caucasus. Moscow: Nedra, 64–71. [in Russian]
- Murzagaliev, D.M. (1998). Geodynamics of the Caspian region and its reflection in geophysical fields. *Geology of oil and gas*, 2, 10–15. [in Russian]
- Murzagaliev, D.M. (2011). Seismological and geodynamic conditions for the development of oil and gas fields on the shelf of the Northern Caspian. *Geology, Geography and Global Energy*, 4, 32–38. [in Russian]
- Narimanov, N.R. (2003). Geodynamic aspects of the formation of the sedimentary cover of the South Caspian Basin. *Geology of oil and gas*, 6, 26–31. [in Russian]
- Shein, V.S. (2007). Geodynamic analysis of oil and gas bearing territories and water areas in connection with the search for oil and gas fields. *Geology of Oil and Gas*, 2, 70–80. [in Russian]
- Sokolov, B.A. (1985). Evolutionary-dynamic criteria for assessing the oil and gas potential of the subsoil. Bosom. [in Russian]
- Sorokhtin, O.G. (1984). The theory of lithospheric plate tectonics is a modern geological theory. M.: o-in "Knowledge" of the RSFSR. [in Russian]

Sorokhtin, O.G., Ushakov, S.A. (2002). Earth development. [in Russian]
Tulegenova, G., Seitov, N.S. (2016). Tectonic zoning and geodynamic conditions for the formation of structures in the North Caspian oil and gas region. Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. *Geology and Engineering Science Series*, 2, 5–16. [in Russian]
Zonenshain, L.P., Korinevsky, V.G., Kazmin, V.G., Sorokhtin, O.G., Koroteev, V.A., Maslov, V.A., ... & Kabanova, L.I. (1984). Structure and development of the Southern Urals from the point of view of lithospheric plate

tectonics. In: History of the development of the Ural paleocean, pp. 8–56. [in Russian]

Zonenshain, L.P., Kuzmin, M.I., Natapov, L.M. (1985). Tectonics of lithospheric plates in the territory of the USSR. Vol. II. [in Russian]

Zonenshain, L.P. et al. (1990). Tectonics of lithospheric plates in the territory of the USSR. Book 1. Subsoil. [in Russian]

Надійшла до редколегії 10.09.22

С. Алієва, канд. геол.-мінералог. наук, доц.,

E-mail: suaza@mail.ru,

Азербайджанський державний університет нафти і промисловості,
пр. Азадлиг, 34, Баку, Азербайджан

ГЕОДИНАМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ КАСПІЙСЬКОЇ МЕГАЗАПАДИНИ І СУМІЖНИХ ТЕРИТОРІЙ

Завданням цього дослідження є встановлення зв'язків між особливостями геодинамічної еволюції складнопобудованої, гетерогенної за своєю геологічною будовою, Каспійської мегазападини та суміжних з нею регіонів – з можливостями оцінки перспектив нафтогазоносності всієї цієї території. З цією метою було проаналізовано дані опублікованих робіт з геодинамічної еволюції вищевказаної території та на основі цього аналізу складено зведену карту геодинамічної еволюції Каспійської мегазападини та суміжних регіонів, поєднану з оптимальним системним нафтогазогеологічним районуванням цієї території, раніше розробленим авторами цієї роботи. Проведений аналіз ресурсів нафти і газу по окремих великих ланках оптимальної системи районування з особливостями їхньої геодинамічної еволюції показав, що на дослідженій території в основному існує пряма залежність кількості та щільності вуглеводневих ресурсів від кількості стадій геодинамічної еволюції земної кори, що пройшли тут, а також наявності або відсутності зон палеоспредингу (рифтів) та зон палеосубдукції (острівних дуг).

Ключові слова: Каспійська мегазападина, Азербайджан, геодинаміка, складно побудовані регіони, оптимальне системне нафтогазо-геологічне районування, ресурси ПВ, перспективи нафтогазоносності, органічна речовина, розсіяна органічна речовина.

UDC 553.98(262.81)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.03>

E. Pogorelova, PhD (Geol.), Associate Prof.,
E-mail: yy_pgrlova@mail.ru;
M. Abdulla-zada, PhD (Phys.-Math.),
E-mail: murad.abdullazade@asoiu.edu.az;
Azerbaijan State Oil and Industry University,
34 Azadlig Ave., Baku, Azerbaijan

ANTI-CAUCASIAN FOLDING OF THE KURA-SOUTH CASPIAN HOLLOW (BY THE EXAMPLE OF SOUTH CASPIAN BASIN AND CIS-LESSER CAUCASIAN TROUGH)

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

The South Caspian Basin (SCB) is the deepest submerged sedimentary basin in the World and occupies the entire southern deep-water part of the Caspian Sea and the Kura and West Turkmenian lowlands adjacent to it from the west and east. The SCB has the thinnest (6...8 km) consolidated oceanic-type crust and the thickest sedimentary cover (25...30 km). The thickness of the Pliocene-Quaternary deposits is 10...12 km. The thickness of the main oil and gas complex – Productive-Red-Colored Strata of the Lower Pliocene is 7 ... 8 km. More than 6 km of volcanic-sedimentary deposits accumulated within the Lesser Caucasian trough at the Mesozoic stage of development. However, in the western part of the trough the translucent pre-Jurassic basement which has a northeastern orientation formed a similar orientation of the overlying deposits. All of the above mentioned events took place under conditions of compression in the north of SCB which were realized at the level of the consolidated crust by subduction, and at the level of the sedimentary cover by structure forming processes. Primary migration passes into the lateral from the submerged zones to the uplifted ones. Deep faults that have formed transverse folding can also serve as migration routes. The submerged predominantly gas-bearing depositional zone of the Productive Strata is represented by folding of both Caucasian and anti-Caucasian strike. Despite the fact that the Kura-South-Caspian depression at the present stage covers the territory from the Dziruly massif in the west to the West Turkmenian depression in the east inclusive as a single negative structural element, in the Mesozoic time as follows from the above it represented two independent areas of subsidence and sediments accumulation in the Transcaucasian microcontinent (western part) and the Greater Caucasian-South Caspian rift basin (eastern part). Therefore, the anti-Caucasian folding of the Kura-South Caspian depression has a different genesis and naturally a different oil and gas potential.

Keywords: oil and gas bearing, oil and gas potential, folding, Transcaucasian microcontinent.

Challenging problem. The South Caspian Hollow (SCH) is the most deeply submerged sedimentary basin in the World and occupies the entire southern deep-water part of the Caspian Sea and the Kura and West Turkmenian lowlands adjacent to it from the west and east.

According to most researchers, it is a relic of the Greater Caucasian-South-Caspian marginal back-arc sea, which

opened up in the Middle Jurassic (Bajocian-Bathian)-Upper Cretaceous, and differs from deep-water basins in the inland and marginal seas of the World in a number of parameters and indicators (Fig. 1) (Kadirov, Gadirov, 2014; Mamedov, 2008; Yudin, 2008).

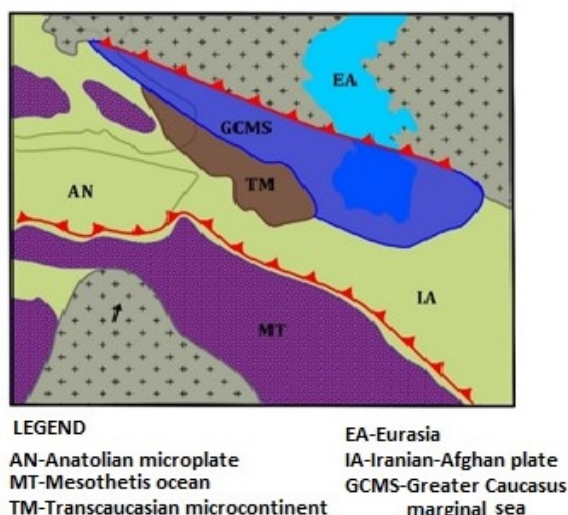


Fig. 1. Geodynamics of the Caucasian-South-Caspian region in the Mesozoic-Paleogene time (by Mamedov, 2008)

The South Caspian basin has the thinnest (6...8 km) consolidated oceanic-type crust and the thickest sedimentary cover (25...30 km). The thickness of the Pliocene-Quaternary deposits is 10...12 km. The thickness of the main oil and gas complex – the Productive-Red-Colored Strata – the Lower Pliocene is 7...8 km) (Gahramanov, 2017; Alizade et al., 2018; Geology of Azerbaijan, 2007).

Research analysis. Since all sedimentary-rock basins of the world have hydrocarbon reserves, researchers are faced with the task of identifying hydrocarbon accumulations

in traditional and unconventional traps. For this, in our case, paleotectonic and structural analysis of the development of the Kura-South Caspian basin is used in order to identify the above-mentioned objects.

SCB was formed in the Arabian-Eurasian collision zone and bordered by the mountain systems of the Greater Caucasus, Kopetdag, Talysh, and Albours (Khailov, 1985; Alizade et al., 2018).

Pre-Lesser Caucasian trough is also located in this collision zone, with the only difference that at the Mesozoic stage of

© Pogorelova E., Abdulla-zada M., 2023

development it was an integral part (shallow sea) of the Paleozoic Transcaucasian microplate an ensialic basement (Fig. 2, 3) (Golonka, 2007, Pogorelova, Serikova, 2010).

In the Late Triassic, the main oceanic basin Tethys opened up, as the opening of which the Iranian-Afghan microcontinent began to move from south to north, towards Eurasia. The geometry of this continent contributed to the

pushing of the Kura (Transcaucasian microcontinent) and South Caspian (Greater Caucasian marginal sea) depressions towards the Eurasian Plate (Fig. 4). At the point of colliding of the plates, a subduction zone (Absheron sill) and collisions (orogen of the Greater Caucasus) were formed (Abdullaev et al., 2015).

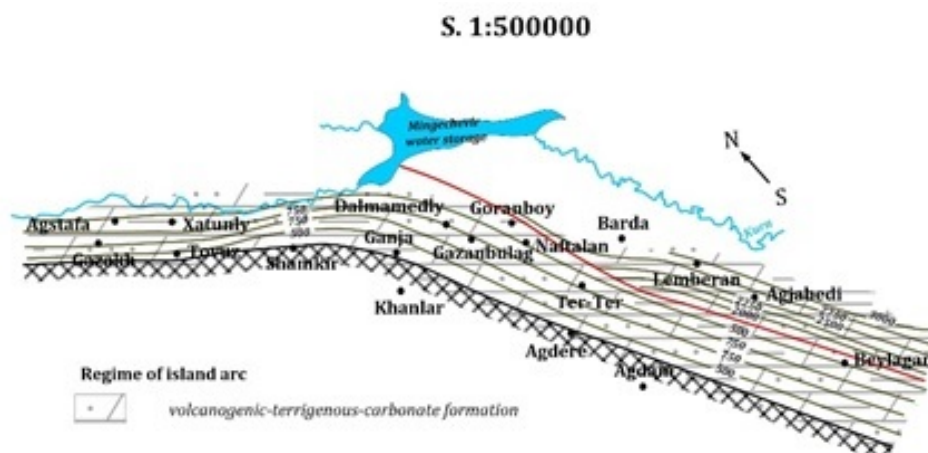


Fig. 2. Paleotectonic map of the Late Jurassic stage of the Cis-Lesser Caucasian trough (composed by Pogorelova, 1991)

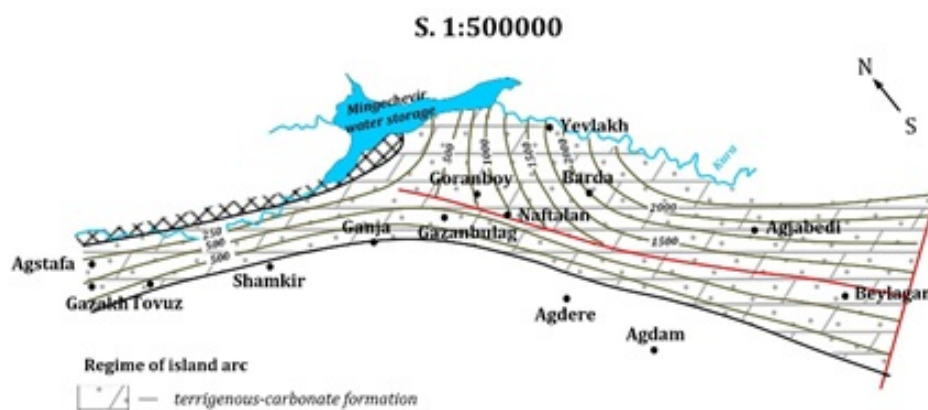


Fig. 3. Paleotectonic map of the Early Cretaceous stage of the Cis-Lesser Caucasian trough (composed by Pogorelova, 1991)



Fig. 4. Scheme of lithospheric plates relationship along the framing of the South Caspian Hollow (by Narimanov, 2008)
Borders: 1 – collision; 2 – spreading; 3 – subduction; 4 – direction of movement of lithospheric plates

Objective of the research. The purpose of the research is to determine the lithofacies composition of specific stratigraphic units in a geodynamic model to identify and predict hydrocarbon accumulations in the deep buried sediments. Stratigraphic surfaces, not refined by well results, were determined by the propagation of velocities of seismic waves (Pogorelova, 2021).

This concerns, first of all, the Meso-Cenozoic deposits of the Lesser Caucasian trough, since accumulations of oil and gas were found within it both in the Mesozoic deposits (Gullyuja) and in the Paleogene-Miocene (Gazanbulag, Naftalan). Today the main work on the search and production of hydrocarbons is aimed at the deposits of the lower Pliocene (productive strata) on the shelf of the South Caspian.

The Cis-Lesser Caucasus trough separated from the South and North by deep faults began to emerge as an independent structure on the southern side of the Kura depression starting from the Bathonian time (therefore the sedimentary deposits of the trough include not only molasse formations but also the deposits preceding them), and the Greater Caucasian-South-Caspian back-arc marginal sea like a rift was opened in the Bajocian-Bathonian and Upper Cretaceous time on the active margin of the Mesotethys (Mamedov, 2008; Pogorelova, 2010).

Research methodology. To solve the problem, on the basis of geophysics, petrophysics, lithostratigraphy, volcanology, paleotectonic, structural maps and isopach were compiled; based on paleomagnetic data, a geodynamic analysis of the formation and development of the Lesser Caucasus trough was carried out (Hudson et al., 2008; Gamkrelidze et al., 1981; Ophiolites of the Lesser Caucasus, 1985).

A large amount of material on the Black Sea-Caspian megabasin was compared, and in order to identify not only the places of hydrocarbon accumulations, but also their generation, the geochemical component of the Meso-Cenozoic deposits was also considered. For this purpose, materials of mud volcanoes, widespread in the region, were used (Guliyev, Tagiyev, 2001; Mikhailov, 2017; Aliyev, 2008).

Laying out the main material. Over 6 km of volcanic-sedimentary deposits accumulated within the Lesser Caucasus trough at the Mesozoic stage of development; however, in the western part of the trough, a translucent pre-Jurassic basement, which has a northeastern strike, formed a similar orientation of the overlying deposits. (Fig. 5).

Since the opening the riftogenic Greater Caucasus-South Caspian basin, i.e. from the end of the Early Jurassic-Upper Cretaceous to the end of the Mesozoic, 4...6 km of sediments accumulated in the depression with the greatest thickness in the area of the Absheron threshold (8...10 km).

By the end of the Oligocene-Early Miocene time, the sedimentary stratum in the South Caspian depression (already separated into a closed marine basin) was 14...16 km. This means that the Paleocene-Eocene period accounts for an average of 10 km of deposits (Alizade et al., 2018).

In the Cis-Lesser Caucasus trough, in its western part, the monoclinial subsidence of the Paleocene-Eocene deposits towards the Kura depression is complicated by a number of structural promontories of the anti-Caucasian strike, fixed in the area of the Tovuz-Gazakh, Gyragkesaman, Khatunly areas, and clearly shows that the modern structural plan, where these protrusions are clearly visible along the top of the Eocene, was formed during the deposition of these formations, and is not associated with a younger restructuring. This circumstance is undoubtedly connected, as mentioned above, with the reduced thickness of the Mesozoic, the approach to the surface in the Paleocene-Eocene period of the pre-Jurassic basement and, as a result, with the translucence of the pre-Jurassic submeridional plan, correcting the formation of a younger, sublatitudinal Caucasian plan (Fig. 6).

By the beginning of the Oligocene-Miocene (Maikopian) stage of development, the region was covered by a short-term uplift associated with the entry of the Lesser Caucasus into the orogenic stage of development. Then a transgression occurred again and a significant area of the Eocene land was covered by the Maikopian Sea, although the contours of the sea were very indented, representing an alternation of promontories and bays.

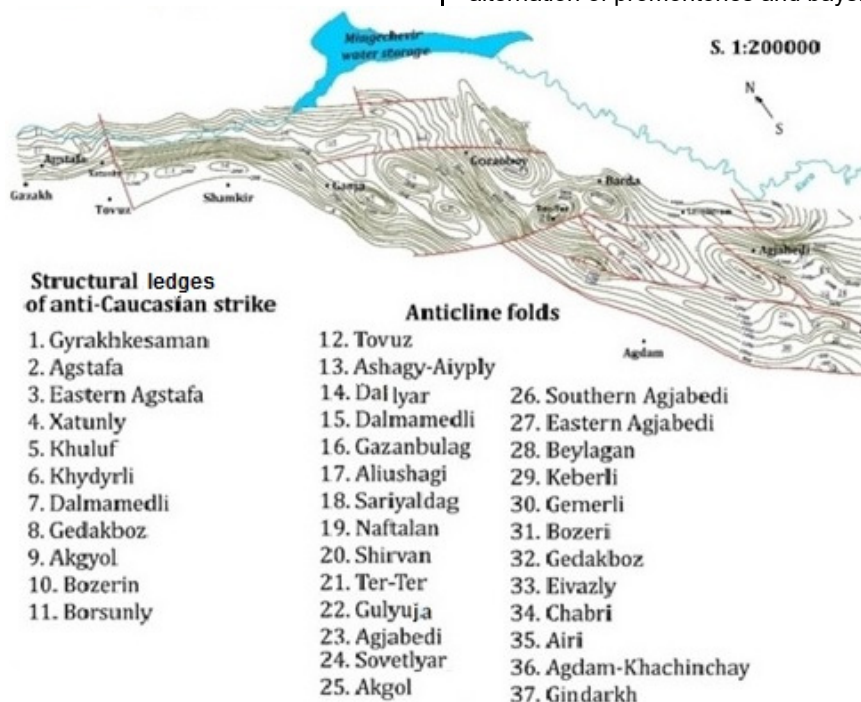


Fig. 5. Structural map by the surface of the Mesozoic of the Cis-Lesser Caucasian trough (composed by Pogorelova, 1991)



Fig. 6. Structural map by the surface of the Eocene of the Cis-Lesser Caucasian trough (composed by Pogorelova, 1991)

Like the surface of the Eocene, the surface of Maikopian outlines a number of structural promontories of the anti-Caucasian strike, located in the western part of the Cis-Lesser Caucasian trough, plunging in a northerly direction.

The inherited development of structures was supplemented by the influence of a normal fault that appeared here and the inherited development of the transverse Revazlyu-Uchgyul deep fault (near the towns Khatunly and Tovuz (Fig. 7).

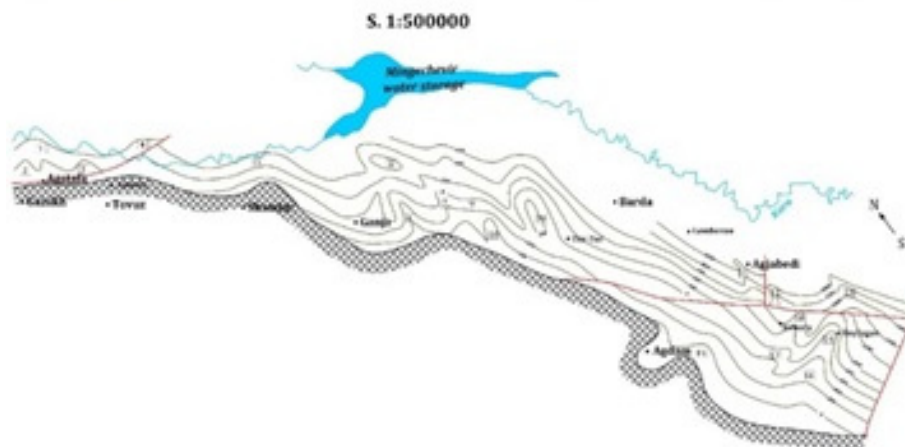


Fig. 7. Structural map by the surface of the Maikopian of the Cis-Lesser Caucasian trough (composed by Pogorelova, 1991)

The South Caspian depression in the Miocene-Pliocene-Quaternary time accumulated a sedimentary layer more than 15 km thick, where the Lower Pliocene Productive-Red-colored sedimentary sequence 6...7 km thick is of the greatest interest.

All of the above mentioned events occurred under conditions of compression in the north of the South Caspian basin, which were realized at the level of the consolidated crust by subduction, and at the level of the sedimentary cover – by structure-forming processes (Mamedov, 2008).

Concerning the Cis-Lesser Caucasian trough, it is not necessary to speak about the existence of such a trough in the Miocene, since it was a far onboard part of the Yevlakh-Agjabedi trough (its far southwestern trough), borderline with the rising block of the Lesser Caucasus (Pogorelova, 2010).

At the Pliocene-Quaternary stage, the trough turned into an inclined alluvial-deltaic plain. Although Pliocene deposits have accumulated here from 0 to 500...1000 m, the smallest number of structural elements is confined to them. These are, again, monoclinaly dipping towards the Kura basin, complicated by transversely oriented structural noses (Fig. 8).

There is no doubt that Mesozoic tectonics put its mark on the general geotectonic appearance of the Pliocene-Quaternary at the South Caspian as well. However, there is no reason to speak about the complete identity of the structural plans of the Pliocene and Mesozoic, and even the Miocene. Moreover, based on the results of studies on the Absheron Peninsula and in Gobustan, where there is a sharp discrepancy in the orientation of the structures of the Pliocene and the underlying interval, it can be assumed that the Quarter-Pliocene structural stage within the Absheron-Pribalkhan zone of the uplifts of the South Caspian has superimposed character (the Mesozoic trough corresponds to the Absheron-Pribalkhan zone of uplifts) (Guliyev et al., 2011). Moreover, the highest degree of tectonic activity was recorded here in the late Pliocene time, i.e., after the accumulation of a thick sandy-clay weakly dislocated Lower Pliocene cover (Mekhtiev et al., 1984; Yudin, 2008).

Two transverse deep faults pass through the central part of the South Caspian basin – Sefidrud-Karabogaz and Central Caspian. To the west of them is the Shakh-Azizbekov deep fault of submeridional strike. All sublongitudinal faults are crossed by a series of

sublatitudinal faults almost parallel to each other. This zone of ancient transverse faults, located south of the Sangachal-Ogurjali sublatitudinal zone, corresponds to the zone of transverse folding of the Oligocene-Anthropogenic sediment complex (Fig. 9, 10).

According to the results of detailed gravimetric studies, an extended (about 150 km) Alov-Ataturk zone of maxima was

revealed here, possibly due to Mesozoic folding, complicated by local anomalies of meridional strike, indicating the inherited development of Mesozoic and Pliocene structures here (Babaev, Gadzhiev, 2006). The far northeastern continuation of the Mesozoic zone of the Alov-Ataturk uplifts can be traced within the South Karabogaz zone in the form of gravity maxima and transverse strike faults.

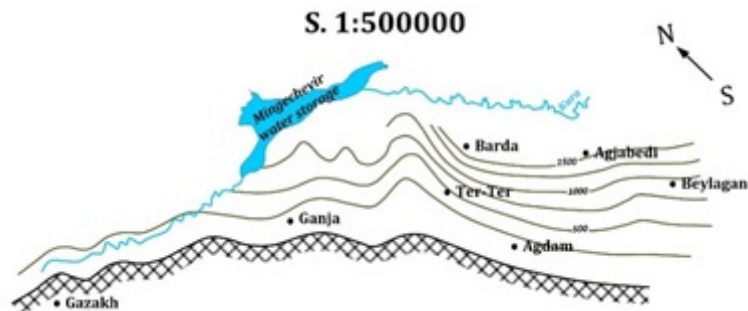


Fig. 8. Isopach map of Neogene deposits of the Cis-Lesser Caucasian trough (composed by Pogorelova, 1991)

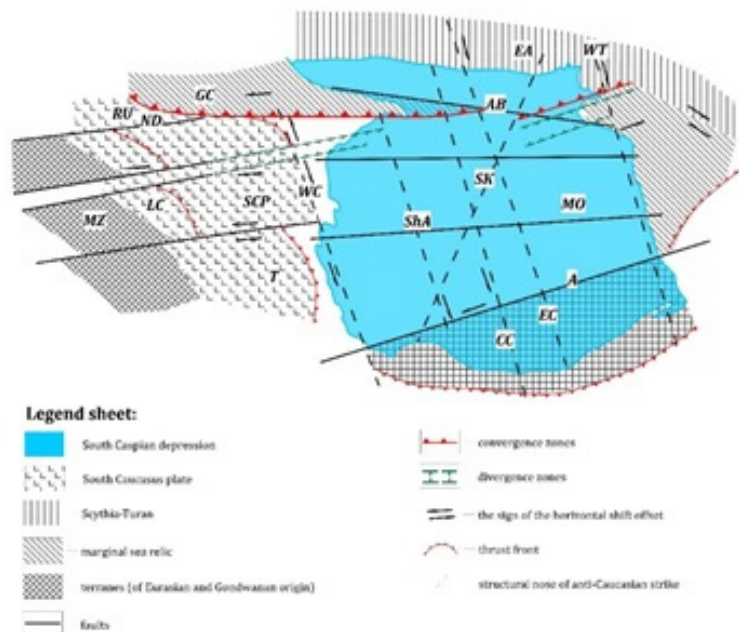


Fig. 9. Scheme of the South Caspian depression boundaries (according to Murtuzayev, 2008 with additions):

- 1 – South Caspian depression; 2 – South Caucasian plate; 3 – Scythia-Turan; 4 – relic of the marginal sea;
5 – terranes (of Eurasian and Gondwanan origin); 6 – faults; 7 – convergence zones; 8 – divergence zones;
9 – the sign of the horizontal displacement along the shift; 10 – thrust front; 11 – structural noses of anti-Caucasian strike;
12 – objects names. Faults: A – Atrek, WT – West Turkmenian, SK – Sefidrud-Karabogaz, AP – Absheron-Pre-Balkhanian,
SO – Sangachal-Ogurjali, MO – Mil-Okarem, EC – East Caspian, CC – Central Caspian, ShA – Shah-Azizbekov, WC – West Caspian,
RU – Revazlyu-Uchgyul, ND – Nizhneagdan-Demirchilyar, GC – Greater Caucasus, LC – Lesser Caucasus, T – Talysh, EA – Eurasia,
SCP – South Caucasus plate, MZ – Miskhan-Zangezur terrane, NA – North Albors terrane

In general, the Alov-Ataturk zone for the most part separates the deep-water basin of the South Caspian from the Turkmen shelf. In the deep-water part of the South Caspian, this zone of uplifts played a dominant role in the distribution of lithofacies of the Lower Pliocene deposits, the formation of the structures of the Turkmen terrace and the marine part of the Lower Kura region. The Alov-Ataturk zone of uplifts is also a unifying link between the Absheron-Pre-Balkhanian anticline zone in the north and the "massif" located in the Pre-Albours zone (Fig. 10).

The zone of cross folding is confined to the deep-water part of the basin, and the Oligocene-Anthropogenic sediment complex itself is submerged to depths of up to

8000 m, and in synclines – up to 10000 m. According to the thermal catalytic theory, such depths correspond to the main phase of gas formation (Dadashev et al., 2010).

Primary migration passes into the lateral from the submerged zones to the uplifted ones. Deep faults that have formed transverse folding can also serve as migration routes. The submerged, predominantly gas-bearing, depositional zone of the Productive Strata is represented by folding of both the Caucasian and anti-Caucasian strike.

The largest gas condensate field Shah Deniz with a preliminary estimate of proven geological reserves of more than 1.2 trillion m³ of gas and 300 million tons of condensate was put into development in 2007. In the large promising

structures adjacent to the Shah Deniz field, Absheron, Nakhchivan, Zafar-Mashal, as well as the chain of cross anticlines Gulistan-Ataturk, Gara Garayev – I. Huseynov, Avesta – J. Mamedguluzada the content of condensate in

the gas phase at depths of more than 6000...6500 m. The source of gas generation can be Paleogene-Miocene and Mesozoic deposits (Alizade et al., 2018; Fedorov, 2007).



Fig. 10. Anti-Caucasian folding of the South Caspian depression (by Yusifzade et al., 2013)

Conclusions. As for the cross folding of the Cis-Lesser Caucasian trough, here the oil and gas potential is associated with Cretaceous-Paleogene deposits, which are hypsometrically located much higher than those of the South Caspian depression, and therefore, mainly, the accumulations here are oil and gas bearing. Purely gaseous manifestations were noted only in the Gulluja area, which, as a transverse structure, manifests itself only on the Eocene surface (it fades in the overlying layers) (Fig. 6). This is most likely due to the shallow occurrence of Eocene deposits (up to a depth of 2000 m) and in the process of lateral migration, the Gulluja structural ledge turned out to be the last obstacle in the way of the secondary gas mixture, which filled the Gulluja trap.

Despite the fact that the Kura-South-Caspian depression at the present stage covers the territory from the Dziruly massif in the west to the West Turkmenian depression inclusive in the east as a single negative structural element, in the Mesozoic time, as follows from the above, it represented two independent areas of subsidence and accumulation of sediments within the Transcaucasian microcontinent (western part) and the Greater Caucasian-South Caspian rift basin (eastern part). Therefore, the anti-Caucasian folding of the Kura-South-Caspian depression has a diverse genesis and, naturally, a different oil and gas potential.

References

- Abdullaev, N.A., Kadirov, F., Guliev, I.S. (2015). Subsidence history and basin-fill evolution in the South Caspian Basin from geophysical mapping, flexural backstripping, forward lithospheric modelling and gravity modelling. In: Brunet, M.-F., McCann, T. Sobel Teds "Geological Evolution of Central Asian Basins and the Western Tien Shan Range", 427 Geological Society, London, Special Publications, 175–196.
- Aliiev, Ad.A. (2008). Evolution of ideas about mud volcanism South Caspian depression. *Proceedings of the Institute of Geology of ANAS*, 37 p. [in Russian]

- Alizade, A.A., Guliyev, I.S., Mamadov, P.Z., Aliyeva, E.G., Feyzullayev, A.A., Huseynov, D.A. (2018). Productive Strata of Azerbaijan. Vol. I. M: Nedra, 305. [in Russian]
- Babaev, D.Kh., Gadzhiev, A.N. (2006). Deep structure and prospects of oil and gas potential of the Caspian Sea basin. Baku: Nafta-Press, 305 p. [in Russian]
- Dadashev, F.G., Poletaev, A.V. et al. (2010). Zones of predominant gas accumulation in the South Caspian depression. *Azerbaijan oil industry*, 3, 9–15. [in Russian]
- Fedorov, D.L. (2007). Influence of geodynamics on the oil and gas potential of the Caspian megabasin. *Geology and geophysics*, 3 (969), 1–8. [in Russian]
- Gahramanov, G.N. (2021). Formation of Oil and Gas Reservoirs in the Great Depths of the South Caspian Depression. *Earth Sciences Research Journal*, 21, 4, 169–174.
- Gamkrelidze, I.P., Dumbadze, G.D., Kekelia, M.A., Khmoladze, I.I., Khutsishvili, O.D. (1981). Ophiolites of the Dzirul massif and problems of Paleo-Tethys in the Caucasus. *Geotectonics*, 5, 43–57. [in Russian]
- Geology of Azerbaijan. (2007). Vol. I. Stratigraphy, part II. Publishing house "NaftaPress", p. 398–435. [in Russian]
- Golonka, J. (2007). Geodynamic evolution of the South Caspian Basin. Oil and gas of the Greater Caspian area. *AAPG Bulletin*, 83(55), 17–41.
- Guliyev, E., Aliyeva, D., Huseynov, A., Feyzullayev, A., Mamedov, P. (2011). Hydrocarbon Potential of Ultra Deep Deposits in the South Caspian Basin. *Search and Discovery*, article № 10312.
- Guliyev, I.S., Tagiyev, M.F., Feyzullayev, A.A. (2001). Geochemical characteristics of organic matter from Maikop rocks of eastern Azerbaijan. *Lithology and Mineral Resources*, 36, 3, 280–285.
- Hudson, S.M., Johnson, C.L., Rowe, H.D., Efendiyeva, M.A., Feyzullayev, A.A., Aliyev, C.S. (2008). Stratigraphy and geochemical characterization of the Oligocene-Miocene Maikop Series: implications for the paleogeography of Eastern Azerbaijan. *Tectonophysics*, 451, 1–4, 40–55.
- Kadirov, F.A., Gadirov, A.H. (2014) A gravity model of the deep structure of South Caspian Basin along submeridional profile Alborz–Absheron Sill, *Global and Planetary Change*, 114, 66–74.
- Khalilov, E.N. (1985) Deep geological structure of the earth's crust and upper mantle of the South Caspian and adjacent regions. *Azerbaijan Oil Industry*, 4, 10–14. [in Russian]
- Mekhtiev, Sh.F., Salaev, S.G. et al. (1984). On the question of the structure and formation of the basin of the South Caspian. *Intern. geol. congress, XXVII session of the USSR, M.*, 118–124. [in Russian]
- Mikhailov, V. (2017). Comparative characteristics of the Maikop series of the Caspian-Black Sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77(2), 59–71. [in Russian]

Murtuzayev, I.R. (2008). To the question of the border of South Caspian plate. *Azerbaijan oil industry*, 8, 7–12. [in Russian]

Narimanov, N.R. (2008). The impact of geodynamic processes on oil and gas formation in the Caspian Basin. *Azerbaijan oil industry*, 8, 13–18. [in Russian]

Ophiolites of the Lesser Caucasus. (1985). Moscow: Nedra, 240 p. [in Russian]

Pogorelova, E.Yu. (2010). Structural relationships of the Meso-Cenozoic complex of sediments of the Cis-Lesser Caucasian trough. *Azerbaijan Oil Industry*, 2, 8–15. [in Russian]

Pogorelova, E.Yu. (2021). Geodynamic features of the Black Sea-South Caspian megadepression evolution in the Meso-Cenozoic time. *IV International Scientific and Practical Conference "Sustainable Development and Green Growth on the Innovation Management Platform" (SDGG 2021)*, Vol. 291 E3S Web Conf., 291 (2021) 02004 Abstract.

Pogorelova, E.Yu., Serikova, U.E. (2010). Paleotectonic reconstructions of the development of the Lesser Caucasus trough in order to identify promising oil and gas objects. *Oil, gas and business*, 12, 37–41. [in Russian]

Yudin, V.V. (2008). Structural-geodynamic map of the Black and Caspian Seas Region. *International Conference on Petroleum Geology & Hydrocarbon Potential of Caspian and Black Sea Regions. 6–8 October 2008, Baku, Azerbaijan*. [in Russian]

Yusifzade, Kh.B. (2013). Application of modern technologies in the field of exploration and production of oil and gas fields in Azerbaijan. *Azerbaijan oil industry*, 7–8(1), 3–13. [in Russian]

Mamedov, P.Z. (2008). The reasons for the rapid subsidence of the earth's crust in the South Caspian Basin. *Azerbaijan oil industry*, 1(1), 8–20. [in Russian]

Список використаних джерел

Абдуллаев, Н.А., Кадыров, Ф., Гулиев, И.С. (2015). История погружения и эволюция накопления осадков в Южно-Каспийском бассейне на основе геофизического картирования бассейна прогибания, литосферного моделирования и гравитационного моделирования.

Алиев, Ад.А. (2008). Эволюция представлений о грязевом вулканизме Южно-Каспийской впадины. *Труды Института геологии НАНА*, 37 с.

Ализаде, А.А., Гулиев, И.С., Мамедов, П.З., Алиева, Э.Г., Фейзуллаев, А.А., Гусейнов, Д.А. (2018). Продуктивная толща Азербайджана. Том I. М.: Недра, 305 с.

Бабаев, Д.Х., Гаджиев, А.Н. (2006). Глубинное строение и перспективы нефтегазоносности Каспийского бассейна. Баку: Нафта-Пресс, 305 с.

Гамкрелидзе, И.П., Думбадзе, Г.Д., Кекелия, М.А., Хмоладзе, И.И., Хуцишвили, О.Д. (1981). Офиолиты Дзирульского массива и проблемы Палеотетиса на Кавказе. *Геотектоника*, 5, 43–57.

Геология Азербайджана. (2007). Том I. Стратиграфия, часть вторая. Издательство "НафтаПресс", с. 398–435.

Гулиев, И., Алиева, Э., Гусейнов, Д., Фейзуллаев, А., Мамедов, П. (2011). Углеводородный потенциал глубокопогруженных отложений Южно-Каспийской впадины. *Поиск и разведка*, статья № 10312.

Дадашев, Ф.Г., Полетаев, А.В. и др. (2010). Зоны преимущественного газонакопления в Южно-Каспийской впадине. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 3, 9–15.

Кадыров, Ф.А., Гадиров, А.Х. (2014). Гравитационная модель глубинного строения Южно-Каспийской впадины по субмеридиональному профилю Эльбурс-Абшеронский порог. *Глобальные и планетарные изменения*, 114, 66–74.

Мамедов, П.З. (2008). Причины быстрого прогибания земной коры в Южно-Каспийской впадине. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 1(1), 8–20.

Мехтиев, Ш.Ф., Салаев, С.Г. и др. (1984). К вопросу о строении и формировании бассейна Южного Каспия. *Международ. геол. конгресс., XXVII сессия СССР, М.*, 118–124.

Михайлов, В. (2017). Сопоставительная характеристика майкопской серии Каспийско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 77 (2), 59–71.

Муртузаев, И.Р. (2008). К вопросу о границе Южно-Каспийской плиты. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 8, 7–12.

Нариманов, Н.Р. (2008). Влияние геодинамических процессов на нефтегазообразование в Каспийском бассейне. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 8, 13–18.

Офиолиты Малого Кавказа. (1985). Москва: Недра, 240 с.

Погорелова, Е.Ю. (2010). Структурные соотношения мезо-кайнозойского комплекса отложений Предмалокавказского прогиба. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 2, 8–15.

Погорелова, Е.Ю. (2021). Геодинамические особенности эволюции Черноморско-Южно-Каспийской мегавпадины в мезо-кайнозое. *IV Международная научно-практическая конференция "Устойчивое развитие и зеленый рост на платформе управления инновациями" (SDGG 2021)*, Vol. 291 (2021), E3S Web Conf., 291 02004 Abstract.

Погорелова, Е.Ю., Серикова, У.Е. (2010). Палеотектонические реконструкции развития Предмалокавказского прогиба с целью определения перспективных нефтегазоносных объектов. *Нефть, газ и бизнес*, 12, 37–41.

Федоров, Д.Л. (2007). Влияние геодинамики на нефтегазоносность Прикаспийского мегабассейна. *Геология и геофизика*, 3 (969), 1–8.

Халилов, Э.Н. (1985). Глубинное геологическое строение земной коры и верхней мантии Южного Каспия и прилегающих районов. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 4, 10–14.

Юдин, В.В. (2008). Структурно-геодинамическая карта региона Черного и Каспийского морей. *Материалы Международной конференции по нефтегазовой геологии и углеводородному потенциалу регионов Каспийского и Черного морей, 6–8 октября 2008 г., Баку, Азербайджан*.

Юсифзаде, Х.Б. (2013). Применение современных технологий в области разведки и добычи месторождений нефти и газа в Азербайджане. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 7–8(1), 3–13.

Gahramanov, G.N. (2021). Formation of Oil and Gas Reservoirs in the Great Depths of the South Caspian Depression. *Earth Sciences Research Journal*, 21, 4, 169–174.

Golonka, J. (2007). Geodynamic evolution of the South Caspian Basin. Oil and gas of the Greater Caspian area. *AAPG Bulletin*, 83(55), 17–41.

Guliyev, I.S., Tagiyev, M.F., Feyzullayev, A.A. (2001). Geochemical characteristics of organic matter from Maikop rocks of eastern Azerbaijan. *Lithology and Mineral Resources*, 36, 3, 280–285.

Hudson, S.M., Johnson, C.L., Rowe, H.D., Efendiyeva, M.A. Feyzullayev, A.A., Aliyev, C.S. (2008). Stratigraphy and geochemical characterization of the Oligocene-Miocene Maikop Series: implications for the paleogeography of Eastern Azerbaijan. *Tectonophysics*, 451, 1–4, 40–55.

Надійшла до редколегії 08.08.22

Є. Погорелова, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: uy_pgrlova@mail.ru;
М. Абдулла-заде, канд. фіз.-мат. наук,
E-mail: murad.abdullazade@asoiu.edu.az;
Азербайджанський державний університет нафти та промисловості,
пр. Азадлиг, 34, Баку, Азербайджан

АНТИКАВКАЗЬКА СКЛАДЧАТИСТЬ КУРИНСЬКО-ПІВДЕННОКАСПІЙСЬКОЇ ЗАПАДИНИ (НА ПРИКЛАДІ ПІВДЕННОКАСПІЙСЬКОГО БАСЕЙНУ І ПЕРЕМАЛОКАВКАЗЬСЬКОГО ПРОГІНУ)

Південнокаспійська западина (ПКЗ) є найглибшим осадовим басейном у світі і займає всю південну глибоководну частину Каспійського моря і прилеглі до нього із заходу та сходу Куринську та Західнотуркменську низовини. ПКЗ має найтоншу (6...8 км) консолідовану кору океанічного типу та найпотужніший осадовий чохол (25...30 км). Потужність пліоцен-четвертинних відкладень становить 10...12 км. Потужність основного нафтогазоносного комплексу – продуктивних червонокольорових товщ нижнього пліоцену становить 7...8 км. У межах Малокавказького прогину на мезозойському етапі розвитку накопичилося понад 6 км вулканогенно-осадових відкладень. Однак у західній частині прогину простежується доюрський фундамент, що має північно-східне орієнтування і формує аналогічне орієнтування вищезалегалих відкладів. Ці явища відбувалися в умовах стиснення на півночі ПКЗ і реалізувалися на рівні консолідованої кори субдукційними, а на рівні осадового чохла – структуротвірними процесами. Первинна міграція переходить у бічну – із занурених зон у підняті. Глибинні розломи, що сформували поперечну складчастість, також можуть служити шляхами міграції. Занурена переважно газонасна зона осадконакопичення продуктивної товщі представлена складчастістю як кавказького, так і антикавказького простягання. Незважаючи на те, що Куринсько-Південнокаспійська западина на сучасному етапі охоплює територію від Дзирульського масиву на заході до Західнотуркменської западини на сході включно, як єдиний негативний структурний елемент, у мезозойський час, як випливає з вищевикладеного, вона являла собою дві самостійні області осадконакопичення в Закавказькому мікроконтиненті (західна частина) та Великому Кавказько-Південнокаспійському рифтогенному басейні (східна частина). Тому антикавказька складчастість Куринсько-Південнокаспійської западини має інший генезис і, природно, іншу нафтогазоносність.

Ключові слова: нафтогазоносність, складчастість, Закавказький мікроконтинент.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.04>

О. Шабатура, д-р геол. наук,

E-mail: oshabatura@knu.ua;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна**ПРОБЛЕМНА ЛАБОРАТОРІЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІРСЬКИХ ПОРІД
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА.
ПІВ СТОРІЧЧЯ В УНІВЕРСИТЕТСЬКІЙ НАУЦІ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)*

Становлення Проблемної лабораторії фізико-хімічних досліджень гірських порід геологічного факультету (Інституту геології) Київського національного університету імені Тараса Шевченка тісно пов'язане з розвитком геологічної галузі України. Багаторічні геохімічні і петрофізичні дослідження на численних і різноманітних геологічних об'єктах заклали основу для формування наукової школи "Прикладна петрогеохімія і петрофізика магматичних порід", під керівництвом проф. М.І. Толстого. У короткій статті наводяться основні віхи розвитку, науково-прикладну етапність Проблемної лабораторії, а також неповний перелік досягнень співробітників лабораторії та людей, до неї дотичних.

Ключові слова: геохімія, петрофізика, геологія в Київському університеті, Проблемна лабораторія фізико-хімічних досліджень гірських порід.

Починаючи з кінця XIX і першої половини XX ст., ряд видатних учених (Ф.Ю. Левінсон-Лесінг, О.М. Заварицький, О.Є. Ферсман та ін.) звернули увагу на необхідність посилення досліджень у галузі речовинного складу гірських порід шляхом залучення інформації про їх фізичні властивості. Дослідження, які традиційно проводилися в цьому напрямі, в основному були зосереджені на вивченні макроскладу порід – петрографії, мінералогії, літології і, в значно меншому обсязі, при вивченні хімічних елементів – в геохімії, ще меншою мірою застосовувався системний підхід із залученням фізичних характеристик порід і фізичних полів над ними. Все це стало стрижнем нової галузі геохімії – прикладної геохімії, тобто геохімічних методів пошуків корисних копалин, які вивчають поширення, міграцію і концентрацію хімічних елементів у різних середовищах, як природних, так і техногенних. Під час створення цієї галузі з'ясувалося, що речовинний склад порід на їх макро- чи мікроелементному рівні відбиває тільки одну, хоча і дуже важливу сторону організації порід. Інша – також важлива сторона – це їх фізичні властивості. Вони разом становлять невід'ємну діалектичну єдність і тому повинні вивчатися сумісно: речовинний склад – хімічними, мікроскопічними, спектральними, ядерно-фізичними і іншими методами, фізичні властивості – методами петрофізики. Застосування петрофізичних методів значно розширює коло задач і підвищує достовірність геологічних досліджень. Цей підхід знайшов багато прихильників, зокрема в Київському університеті (В.Ю. Тарасенко, В.І. Лучицький, М.І. Безбородько, Є.С. Бурксер, П.М. Чирвинський та ін.).

Розвиток прикладної геохімії в Україні почався із середини минулого сторіччя, і з повним правом його слід пов'язувати зі становленням геологічного факультету Київського університету (тепер ННІ "Інститут геології").

Ідеологічні засади створення Проблемної лабораторії формувалися саме в цей час – час екстенсивного розвитку прикладної геохімії, зростання кількості співробітників і науковців та збільшення кількості нових, не схожих один на один, геологічних об'єктів. Вже у 1955–57 рр. М.І. Толстой, разом з Б.О. Гаврусевичем, Н.О. Безпалько, О.В. Бельським займалися геохімічним і радіометричним вивченням кристалічних порід пержанської ділянки Суцано-Пержанської тектонічної зони Українського щита. Надзвичайно продуктивним періодом набуття необхідного методичного і практичного досвіду в галузі геохімічних методів пошуку був час протягом 1957–1964 рр., коли група

науковців на чолі з М.І. Толстим виконувала пошукові геохімічні і петрофізичні роботи в Казахстані.

Якщо виконати періодизацію часу виникнення і розвитку Проблемної лабораторії фізико-хімічних досліджень гірських порід, то перший – "пошуковий" період (1957–1966 рр.) діяльності колективу виконавців згаданих робіт виявився досить плідним. Були закладені підвалини нової наукової школи геологічного факультету КНУ – "Прикладна петрогеохімія і петрофізика магматичних порід". Водночас був створений відповідний творчий колектив: М.В. Толстой (багаторічний науковий керівник робіт), І.М. Остафійчук, В.Г. Молявко, Г.Т. Продайвода, С.Б. Степченко, М.Н. Жуков, Ю.О. Лобанов, а також технічний персонал – Ф.К. Гапеев, А.О. Євграфов, В.В. Тятянченко, Н.В. Шарай та ін. Було започатковано створення необхідної матеріальної бази досліджень: мікроскопи, спектрографи, геофізичне обладнання, вимірювальна апаратура, автотранспорт, польове обладнання, матеріали тощо.

Згадані геологічні роботи в Казахстані мали передусім виробниче значення. Виконувалося геологічне знімання території в межах Крикудукського, Аккудукського, Тасадирського, Боровського гранітоїдних масивів Північного Казахстану; Жамантаського, Улу-Тауського масивів Південного Казахстану. Треба відзначити, що в Казахстані геохімічні пошуки корисних копалин почали застосовувати ще в 30-х роках минулого століття та енергійно використовували в повоєнні роки і після (С.Д. Міллер, А.П. Соловйов). Тут же були розроблені перші в СРСР інструкції щодо проведення металометричних пошуків корисних копалин (1951, 1955 рр.). Але за надзвичайної геологічної строкатості досліджуваних площ повною мірою українські науковці стикнулися з проблемою пояснення закономірностей розподілу хімічних елементів, які часто не мали простого і ясного способу розв'язання. Природною реакцією на такий виклик був зростаючий обсяг дослідних і методичних робіт. На початку 60-х років минулого століття, у співробітництві із створеним Міністерством геології СРСР геолого-геохімічним трестом (А.А. Беус, С.В. Григорян, Ю.Є. Саєт), співробітниками науково-дослідної лабораторії під керівництвом М.І. Толстого були виконані дослідження, присвячені переважно питанням оптимізації літогеохімічного опробування, обробці та аналізу проб, математичним методам обробки масових геохімічних даних. Частина із цих розробок увійшла у ряд офіційних методичних пропозицій і рекомендацій геохімічного тресту і Мінгео СРСР.



Професор Михайло Іванович Толстой

Актуальність, висока ефективність досліджень, зростаюча кваліфікація і творча наснага колективу, зацікавленість виробництва – все це слугувало обґрунтуванням необхідності його подальшого організаційного зміцнення. У січні 1966 р., за підтримки Міністерства геології УРСР і КазРСР, МДУ, ректорату КДУ та ряду інших організацій, Рада Міністрів УРСР прийняла постанову про організацію в Київському державному університеті **Проблемної лабораторії фізико-хімічних досліджень гірських порід**, що і було оформлено у лютому 1966 р. наказом Міністерства вищої і середньої спеціальної освіти УРСР. Науковим керівником був призначений доцент М.І. Толстой, завідувачкою лабораторії – І.М. Остафійчук.

Основним науковим напрямом досліджень було затверджено: вивчення кількісних закономірностей розподілу хімічних елементів і фізичних характеристик у плутонічних гірських породах для встановлення їх генезису, оцінки металоносності.

Як і личить молодій і перспективній науковій організації, був розроблений амбітний п'ятирічний план досліджень. Спираючись на методичні, фактологічні, апаратні розробки попередніх робіт продовжилися дослідження в двох напрямках (в умовних назвах): теоретично-методичному і практичному.

Теоретично-методичний напрям досліджень (1966–1971 рр.) робіт Проблемної лабораторії включав:

- встановлення геологічної і геохімічної інформативності статистичних параметрів і функцій розподілу хімічних елементів та фізичних характеристик порід;
- використання кількісної інформації для оцінки металоносності магматичних утворень, пошуків ореолів розсіювання, визначення регіональних кларків;
- розробка методики кількісного зіставлення, кореляції і розпізнавання геологічних об'єктів за комплексом геохімічних і петрофізичних ознак;
- розробка методики кількісного геохімічного і петрофізичного картування плутонічних утворень;
- розробка оптимального алгоритму обробки геохімічних і петрофізичних даних.

Як можна бачити, деякі пункти не втратили актуальності і сьогодні, а деякі вже стали хрестоматійними поняттями, такими, що ввійшли до підручників і методичних вказівок.

Практична апробація наукових розробок продовжила свою географічну експансію. Роботи тривали на території Сарису-Тенізького підняття Центрального Казахстану, Західного Забайкалля, а також Українського щита. Головними об'єктами досліджень на цьому (як і на попередньому) етапі були гранітоїдні утворення.

Сформувалося надзвичайно потужне кадрове ядро Проблемки, те що зробило його впізнаваним лише за прізвищами: І.М. Толстой, І.М. Остафійчук, В.Г. Молявко, Г.Т. Продайвода, М.Н. Жуков, В. Нагорський, С.Б. Степченко, А.В. Сухорада, А.Ю. Серга. Результати досліджень висвітлювались у багатьох статтях і монографіях (див. додаток).

Крім цих робіт, у лабораторії проводилися апаратно-методичні розробки:

- апаратура і методика лабораторних теплофізичних вимірювань гірських порід (Ю.О. Лобанов);
- апаратура і методика високоточних вимірювань швидкості поздовжніх та поперечних хвиль (Г.Т. Продайвода);
- апаратура і методика комплексного вивчення магнітних властивостей гірських порід (А.В. Сухорада);
- апаратура і методика вдосконаленого наближено-кількісного емісійного спектрального аналізу (П.М. Зубарев, М.С. Гричановський);
- методики високоточного люмінесцентного визначення урану, спектрохімічного аналізу низки рідкісних елементів та ін. (В.Б. Співаковський, Т.Є. Бурксер, Г.І. Миронюк та ін.).

Значну увагу при цьому було приділено підвищенню наукової кваліфікації колективу на основі існуючого творчого надбання.

Наступний етап розвитку Проблемної лабораторії охоплював період з 1971 по 1980 р. Особливістю цього етапу було збереження основних напрямів теоретично-методичної діяльності лабораторії за зміни об'єктів досліджень. Головним об'єктом досліджень замість палеозойських і докембрійських гранітоїдів стали мезокайнозойські новітні вулканогенні утворення Кавказу, Криму, Карпат, Паннонської низини (УНР), Західного Забайкалля.

Така зміна об'єктів спричинена насамперед відмінностями у факторах, що зумовлюють закономірності розподілу хімічних елементів і фізичних властивостей. Традиційний об'єкт досліджень – гранітоїди, в яких багаторічне вивчення кількісних характеристик "сингенетичного" розподілу хімічних елементів і фізичних властивостей плутонічних порід різного генезису не показало наявності універсальних закономірностей. У різних за віком і умовами формування гранітоїдів виявились невдалими спроби виявлення сталих показників просторового розподілу. Причиною цього була практично повсюдна наявність проявів аутометасоматозу, гідротермальних та інших постмагматичних перетворень гранітоїдів, а також процесів гібридизму і палеогеодинамічних змін. Тому, з поради проф. В.С. Коптева-Дворнікова, за основний об'єкт досліджень вирішено було обрати молоді вулканогенні утворення, розподіл хімічних елементів в яких щонайповніше відповідав би умовам формування і складу вихідних магматичних вогнищ. У зв'язку із цим другий етап існування лабораторії можна назвати "вулканологічним".

Перші ж результати досліджень, виконаних на неовулканітах Вірменії і Карпат, продемонстрували правильність обраного напрямку досліджень. Були встановлені регіональні кларки відповідних хімічних елементів у головних (тобто найбільш представницьких) типах вулканітів,

що дозволило виконати їх об'єктивне зіставлення і кореляцію, оцінку геохімічної і металогенічної спеціалізації, розробити методику локального металогенічного прогнозу, яку було успішно впроваджено на Бережанському баритополіметалічному родовищі Закарпаття.

Успішному виконанню робіт з польового і лабораторного вивчення неовулканітів різних районів СРСР сприяла самовіддана праця та ентузіазм працівників лабораторії і студентів, які брали участь у досить складних і нерідко важких гірських експедиціях (Г.Т. Продайвода, В.Г. Моляко, А.В. Сухорада (завідувач лабораторії), С.Б. Степченко, А.Ю. Серга, Є.В. Слинько, Т.І. Самаріна, Л.Я. Табачний, П.С. Воронцов, О.В. Клевцовський, Н.В. Оконішнікова, І.С. Литвиненко, В.І. Козенко, Є.І. Мурейко, В.А. Михайлов та ін.).

У цих роботах брали участь, разом із співробітниками Проблемної лабораторії, геологи МДУ (В.С. Коптев-Дворніков, М.В. Короновський, О.Д. Ракчєєв, М.Д. Петрова), Вірменської АН (С.Г. Карапетян, А.А. Адамян, К.Г. Шірінян), Грузинської АН (Г.С. Дзотценідзе), Мінгео УРСР (В.М. Зайцева, Е.О. Лазаренко, Е.М. Тітов, Б.В. Мерліч), Дебреценського університету (В. Секіне-Фукс, І. Кульчар, С. Дюла), Словацької АН (Б. Цамбел, М. Бемер, Т. Грегор).

Тривали на цьому етапі й активні роботи в галузі апаратних розробок. До найважливіших з них слід віднести:

- високоточні методи оцінки швидкості пружних хвиль і пружних констант у широкому діапазоні температур (Г.Т. Продайвода);

- універсальну установку для термомагнітного аналізу гірських порід і мінералів у широкому інтервалі температур, тиску і складу атмосфери (повітря, інертні гази, окислювальні суміші), а також термомагнітний сепаратор феромагнетиків в інертних газах за їхніми точками Кюри (А.В. Сухорада).

З 1974 р. лабораторія почала випускати збірник наукових праць "Вопросы прикладной геохимии и петрофизики" як науковий збірник Київського університету, що зразу ж фактично став міжвідомчим і виходив щорічно до 1991 р., витримавши 17 випусків.

З цього ж року лабораторія організовує і проводить місячні курси підвищення кваліфікації для працівників Міністерства геології УРСР у галузі геохімічних методів пошуків корисних копалин і математичних методик обробки геологічної інформації (керівник – проф. М.І. Толстой).

Для проведення низькофонових фізичних досліджень Проблемна лабораторія у 1974–1975 рр. створює на території науково-навчальної бази Київського університету "Жуків хутір" (Києво-Святошинський район) свій філіал – низькофонову магнітно-радіометричну станцію, яку пізніше (у 1992 р.) було перетворено у науково-дослідну станцію ядерної геофізики, петрофізики і геоєкології.

З 1981 р. Проблемна лабораторія започатковує третій етап свого розвитку, який тривав до 1990 р. (завідувач лабораторії І.В. Соловйов). Загалом весь етап було присвячено комплексному вивченню гранітоїдів Українського щита, меншою мірою Балтійського. Тому його можна назвати "гранітоїдним докембрійським". Зміна фокусу наукових інтересів полягала в тому, що у процесі регіональних досліджень фанерозойських плутонічних утворень (як інтрузивних, так і ефузивних) був накопичений значний методичний і фактологічний матеріал у галузі кількісного вирішення завдань розчленування, зіставлення, кореляції, оцінки металоносності цих утворень. Практична реалізація таких завдань на багатьох природних об'єктах Казахстану, Кавказу, Карпат, Забайкалля тощо продемонструвала їх досить велику

ефективність. Враховуючи провідну роль докембрійських гранітоїдів у геологічній будові України, цілком слушним було застосувати одержані методичні і фактологічні нароби при вивченні докембрійських гранітоїдів для з'ясування проблем і нерозроблених питань їх стратиграфії, багатьох аспектів металогенії та подолання існуючих труднощів у картуванні. Із цією метою лабораторія розробила програму комплексного вивчення складу, фізичних властивостей, структурно-формаційної належності гранітоїдів УЩ, яка базувалася на єдиній методиці геологічного (структурно-формаційного), петрогеохімічного, петрофізичного, мінералого-петрографічного вивчення із застосуванням єдиної раціональної методики відбору, обробки та аналізу даних.

Принциповим для ефективного використання геохімічних методів у металогенічному прогнозі і пошуках корисних копалин є закон Кларка–Вернадського про повсюдне поширення хімічних елементів, поняття кларків, геохімічних фонів елементів, їхня кількісна характеристика. Оцінка геохімічного фону є запорукою достовірності виявлення геохімічних аномалій, і на цій основі – кількісної оцінки геохімічної і металогенічної спеціалізації об'єктів, їх прогнозно-металогенічного аналізу. Особливо гостро серед вивержених порід ця проблема торкається гранітоїдів, завдяки конвергентності їх утворення, складному петрогенезису, значному впливу на розподіл хімічних елементів різних вторинних процесів, які відіграють провідну роль у рудоутворенні. У зв'язку з цим, крім значної роботи з удосконалення аналітичних засобів і методик, велику увагу в Проблемній лабораторії було приділено розробці оптимальних прийомів опробування, кількісним методами обробки та аналізу геохімічних даних.

Не менш важливою проблемою підвищення ефективності застосування методів прикладної геохімії, особливо під час дослідження кристалічних порід із застосуванням відносних фізичних і фізико-хімічних аналітичних засобів, є проблема стандартів складу відповідних порід. З'ясувалося, що із цілого ряду типів порід таких стандартів не існувало не тільки в СРСР, але і у світі загалом. Тому було розроблено програму створення серії стандартів магматичних порід, яка б відбивала своїм складом усі основні їх петрохімічні різновиди. Основними вимогами при виборі стандартів складу порід були: представитивність (відповідність певним петрографічним класам порід), поширеність, доступність об'єктів опробування для подальшого відбору, необхідна маса стандарту (не менш як кілька сотень кілограмів). У зв'язку із цим для вибору об'єктів опробування проводилися спеціальні експедиції в Україні, на Кольському півострові, у Вірменії, Забайкаллі, де за спеціально розробленою методикою проводився відбір проб. Після їх обробки вони аналізувалися у більш як 70 провідних лабораторіях СРСР, Німеччини, Чехословаччини й оцінювалися за спеціальною методикою. Всього було створено 17 стандартів зразків складу.

Для реалізації наукового завдання, пов'язаного із створенням стандартів зразків гірських порід, було розроблено відповідну програму "Граніт", що виконувалася протягом 1981–1985 рр. Тут головною організацією виступала Проблемна лабораторія (науковий керівник – проф. М.І. Толстой). До роботи над програмою, крім співробітників ПНДЛ, були залучені: проф. В.С. Заїка-Новацький (КДУ); співробітники Львівського університету (проф. Е.К. Лазько, ст. наук. співроб. К.І. Свешніков, доц. В.П. Кирилук і А.М. Лисак); Одеського університету (доц. І.В. Носирєв і В.М. Кадурін); Донецького політехнічного інституту (проф. Б.С. Панов, доц. Р.М. Полуновський); Інституту геохімії і фізики

мінералів АН УРСР (ст. наук. співроб. І.Б. Щербаков, К.Е. Єсипчук, В.І. Орса); Інституту геофізики АН УРСР (ст. наук. співроб. І.К. Пашкевич, М.П. Михайлова); Мінгео УРСР (Б.З. Берзенін, Л.С. Галецький, Е.В. Мельнічук, Л.Ф. Лавріненко та ін.).

Другий підетап (1986–1990 рр.) робіт з програми був також затверджений у ранзі Міжвузівської пріоритетної програми (теж під назвою "Граніт") як розділ цільової республіканської програми. Цей підетап, присвячений комплексному вивченню гранітоїдів північної частини УЩ, виконував той же колектив за прийнятою раніше методикою.

Значного авторитету у країні та за кордоном лабораторія набула в галузі петрофізичних досліджень. При Петрографічному комітеті відділення геології, геохімії, геофізики і гірничих наук АН СРСР і Міністерства геології СРСР у 1985 р. було створено петрофізичну комісію, головою якої був обраний М.І. Толстой, а вченим секретарем – спочатку А.В. Сухорада, а з 1989 р. – А.П. Гожик. Комісія мала статус міжвідомчого всесоюзного органу і працювала до 1991 р. Петрофізичний відділ проблемної лабораторії вважався головною організацією з петрофізики, на базі якого створилася відома як у країні, так і за кордоном петрофізична школа.

Розширилися і зміцніли закордонні творчі зв'язки лабораторії. У 1980 р. з метою зіставлення з гранітоїдами УЩ та інших районів УРСР було розпочато дослідження гранітоїдів Брненського і Дійського масивів Моравії, а також гранітоїдів Словаччини. Роботи на об'єктах Моравії в основному виконували співробітники ПНДЛ (М.І. Толстой, А.В. Сухорада, І.М. Остафійчук, В.Г. Молявко) за допомогою колег з Брненського університету (проф. Г. Штельцл, доц. М. Грегорова, доц. Й. Станек), а у Словаччині їх виконував аспірант проф. М.І. Толстого – Т. Грегор, (співробітник Інституту геології Словацької АН). У роботатах з вивчення словацьких гранітоїдів брав участь академік Б. Цамбел.

Масштабні роботи з комплексного вивчення гранітоїдів НДР та їх зіставлення з гранітоїдами УЩ ПНДЛ проводила в рамках договору про співдружність між Київським і Лейпцизьким університетом. У вивченні гранітоїдів Рудних гір, Гарца брали участь проф. М.І. Толстой і ст. наук. співроб. І.В. Соловйов (від ПНДЛ), а також проф. Г. Ольцах і асист. Г. Юст (від секції фізики Лейпцизького університету). Дворічне наукове стажування проходив у лабораторії інж. Р. Хазе (НДР).

Тривали і поглиблювалися творчі зв'язки з Дебреценським університетом (Угорщина), з комплексного вивчення та зіставлення неовулканітів Угорщини, Карпат і Кавказу. Разом із співробітниками Дебреценського університету (проф. Секі-Фукс, доц. Л. Кульчар) співробітниками лабораторії (проф. М.І. Толстим, ст. наук. співроб. І.М. Остафійчук, ст. наук. співроб. В.Г. Молявком) були проведені польові роботи і відібраний необхідний кам'яний матеріал з об'єктів досліджень (неовулканіти Токайських гір, Бюк, Бадачонь та ін.). Почали успішно розвиватися творчі зв'язки ПНДЛ у галузі комплексного вивчення і зіставлення плутонічних утворень зон тектоно-магматичної активізації Хорватії і України із Загребським університетом СФРЮ, зокрема з акад. І. Юрковичем, проф. В. Меєром, проф. М. Враковичем, проф. Б. Милицей.

Аварія на ЧАЕС і пов'язане з нею забруднення території України не могло не привернути до себе уваги колективу лабораторії. Було прийнято рішення розпочати ініціативні, а згодом і планові геоекологічні дослідження на території Полісся і Карпат. Ініціативні дослідження розпочалися в 1986 р. через створенням радіонуклідного

моніторингу для спостережень за міграцією радіонуклідів в умовах південної частини Київського Полісся (полігон "Жуків Хутір", територія Музею архітектури і побуту (с. Пирогово)). У 1987 р. ці дослідження були поширені на басейни річок Ірпінь, Буча, Мокра (приток р. Буча) та на лісову частину природного заказника "Жуків Хутір". А у 1988 р. – на басейн р. Ворскла (поблизу м. Охтирка Сумської області), Тростянецький (Сумська обл.) і Качанівський (Чернігівська обл.) дендропарки.

За результатами цих досліджень Мінвуз УРСР у 1989 р. сформував міжвузівську програму геоекологічних досліджень щодо вибору і організації системи екологічного моніторингу Полісся і Карпат, науковим керівником якої був затверджений проф. М.І. Толстой, а головною організацією визначена ПНДЛ. У виконанні програми, крім лабораторії, були задіяні: кафедра загальної і теоретичної геології Івано-Франківського інституту нафти і газу (проф. О.М. Адаменко), Інститут геоекологічного моніторингу (Івано-Франківськ), кафедра фізичної географії Львівського держуніверситету (проф. Я.О. Кравчук, доц. А. Богущкий, асп. Н.І. Карпенко), кафедра загальної і морської геології Одеського державного університету (доц. І.В. Носирев, доц. В.М. Кадурін). Отже, на початку сучасного (четвертого етапу існування) ПНДЛ (з 1991 р.) паралельно розроблялися два основні напрями наукових досліджень: традиційний – регіональні петрогеохімічні і петрофізичні дослідження гранітоїдів і новий – геоекологічний.

Базуючись на результатах попередніх досліджень ПНДЛ на територіях з мінімальним техногенним навантаженням (заказники, національні парки, рекреаційні зони), була розроблена і затверджена ДКНТ і Мінвузом України науково-технічна програма "Розвиток регіональних рекреаційних зон України" (головна організація – Проблема лабораторія, керівник – проф. М.І. Толстой). Співвиконавцями були фахівці: Івано-Франківського державного університету нафти і газу (керівник – проф. О.М. Адаменко), Одеського державного університету (керівник – проф. І.П. Зелінський, доц. В.М. Кадурін), Львівського державного університету (керівник – проф. Я.С. Кравчук, доц. А. Богущкий, асп. Н.І. Карпенко).

Роботи за цією програмою охоплювали рекреаційні зони Полісся (Київський та Львівський університети), Карпати (Івано-Франківський державний технічний університету нафти і газу та Київський університет), Причорномор'я (Одеський університет) і були спрямовані на вибір територій найбільш придатних для рекреаційного використання, а також на вивчення їх геоекологічних особливостей і розробку відповідних пропозицій.

З 1995 р. обов'язки зав. лабораторії замість І.В. Соловйова виконував А.П. Гожик, який почав працювати в ПНДЛ ще студентом.

На наступному етапі робіт лабораторії, з кінця 80-х років минулого століття до сьогодення, в традиційному "гранітоїдному" напрямі змінився характер і зміст досліджень – період накопичення фактичних даних шляхом виконання масштабних експедиційних робіт і масових аналітичних досліджень був в основному завершений.

Отже, до 1991 р. були обстежені, опробувані, проаналізовані за єдиною методикою практично всі основні петротипи гранітоїдів УЩ. Загальна кількість проаналізованих характеристик, до яких входили як якісні (геолого-географічні, структурно-формаційні, мінералого-петрографічні, геофізичні), так і кількісні (петрогеохімічні, петрофізичні, мінералогічні), з кожного петротипу порід становила від 100 до 400 ознак.

Це дозволило одержати унікальну за якістю, об'єктивністю і повнотою даних незалежну інформацію, аналогів якої не було не тільки в межах Українського щита, але і по інших щитах. Накопичення такої інформації створило передумови принципово нового етапу вивчення гранітоїдів УЩ, петрогенетичних побудов, стратиграфічного аналізу, металогенічних прогнозів, геологічного картування цієї території. Розпочався період узагальнення даних, їх осмислення, підготовки до друку результатів багаторічних досліджень. Тому цей етап досліджень можна назвати "гранітоїдним – інформаційним".

Початок роботи цього етапу був започаткований ще під час поточної обробки та аналізу даних, переважно в кінці третього етапу, триває й нині – у сучасному четвертому етапі діяльності лабораторії. Протягом кінця третього і на початку четвертого етапів існування лабораторії на матеріалах з комплексного вивчення гранітоїдів УЩ ряд працівників ВНЗ України, що брали участь у виконанні цільової програми "Граніт", захистили докторські дисертації: доц. Е.М. Шеремет (Донецький політехнічний інститут), доц. І.В. Носирев (Одеський університет), доц. К.І. Свешніков (Львівський університет). Крім того, на цьому етапі були захищені ряд кандидатських дисертацій (В.П. Коболев, Т. Грегор), десятки курсових і дипломних студентських робіт.

Слід відзначити, що всі ці роботи супроводжувалися дуже кропіткими, напруженими, різноплановими експедиційними дослідженнями, якими було охоплено райони Українського і Балтійського щитів, а також масовими аналітичними дослідженнями. Від якості і повноти останніх значною мірою залежали об'єктивність і достовірність висновків, геологічна ефективність всієї роботи. У дослідженнях, крім науковців, брали участь інженерно-технічний персонал лабораторії, студенти геологічного факультету – А.П. Гожик, Е.В. Санін, Г.Г. Павлов, Г.В. Заїка-Новацький, К.О. Лобанов, О.В. Клишневський, В.В. Плахута, П.С. Воронцов, В.М. Гайдученко, Н.В. Оконішнікова, М.С. Самодумова, В.І. Козенко та інші, а в обробці та аналізі матеріалів – К.О. Лобанов, Е.В. Слинько, В.В. Плахута, Н.В. Костенко та інші.

Узагальнення результатів і їхня науково-практична оцінка, яка є основою сучасного етапу існування наукової школи ПНДЛ, включає декілька напрямів:

- статистичні оцінки розподілу досліджуваних ознак у відповідних геологічних утвореннях, а також геохімічної (металогенічної) спеціалізації;
- систематизація, класифікація і створення багатознакових банків даних;
- зіставлення, кореляції геологічних об'єктів по комплексу речовино-фізичних ознак;
- оцінка металоносності геологічних утворень;
- оцінка палеогеодинамічних умов формування і існування магматичних утворень.

Крім того, на замовлення Українського державного науково-дослідного геолого-розвідувального інституту (м. Київ) були створені і передані для практичного використання багатознакові банки петрофізичних і петрогеохімічних характеристик провідних петротипів гранітоїдів УЩ. Проводиться також робота з комплексної оцінки рідкіснометалічності гранітоїдних утворень Українського щита, з визначення провідних (типоморфних) ознак їх металогенічної перспективності.

Наука, як і будь-яке інше соціальне явище, має властиві для себе закономірності розвитку. З теорії систем відомо, що розвиток певної структури (наукової у тому числі) носить послідовно-циклічний характер, має

періодизацію з етапом зростання і наступним етапом падіння. Тривалий латентний період формування нового наукового напрямку відзначається різними спробами розв'язання проблеми на базі існуючого наукового інструментарію і пануючої парадигми. У разі неспроможності її розв'язати, пропонуються удосконалені підходи і засоби, відбувається кристалізація нової ідеї за наповненням і формою. За нею слідує період активного бурхливого росту, який через невеликий проміжок часу сягає кульмінації. Потім слідує довгий, найбільш продуктивний, період, що може мати падіння і злети. Заключний етап – згасання, коли вичерпуються можливості подальшого зростання або відсутній потенціал для реновації ідеї. Така крива в кібернетиці відома як "горіння багаття", і багато в чому вона може бути застосовна для опису розвитку наукових ідей і соціальних структур.

ПНДЛ пройшла майже всі класичні стадії свого розвитку згідно з означеною кривою: "латентна", "акматична", "інерційна" та "меморіальна". У повоєнний час швидкого відновлення і великих інвестицій в освіту, науку і виробництво, досить швидко була сформована необхідна "критична маса" ідей, науковців і можливостей для розуміння і постановки значущої наукової проблеми та шляхів її вирішення. В історії Проблемної лабораторії це був час до "пошукового періоду". Організаційне становлення ПНДЛ і найбільшу її продуктивність можна впевнено співвідносити із "акматичною стадією" діяльності наукової школи, що охоплювала "пошуковий", "вулканологічний" та "гранітоїдний" періоди (згідно з періодизацією М.І. Толстого). Поточний період примітний дивергенцією традиційної "гранітоїдно-вулканогенної" наукової тематики на окремі "нішеві" програми. Серед головних варто виділити екологорадіогеохімічні і екогеофізичні дослідження, розробку стандартів складу і властивостей гірських порід і ґрунтів, глибоке переосмислення попередніх результатів, що дало змогу здійснити розробку наукових основ палеогеодинамічного аналізу гранітоїдних утворень за фізичними властивостями (М.І. Толстой, А.П. Гожик, А.В. Сухорада), підготувати і видати серію регіональних монографій, підручників, систематизувати інформацію і створити електронні бази даних тощо.

У загальних рисах поставлену ключову проблему при організації лабораторії, а саме *вивчення кількісних закономірностей розподілу хімічних елементів і фізичних характеристик у плутонічних гірських породах для встановлення їх генезису, оцінки металоносності* було розв'язано. На численних прикладах було продемонстровано можливість пояснення і прогнозу просторового розподілу хімічних елементів, їх петрологічної і металогенічної інтерпретації. Показовим прикладом є вивчення статистичного розподілу титану в деяких масивах Північного Казахстану, виконаного під час геологічного знімання науковцями КНУ в 50–60 рр. Об'єктами досліджень виступали Криккудукський, Баликбайський I і Ащикольський гранодіоритні масиви першої фази інтрузивної діяльності, які сформувалися в епоху інтенсивної складчастості, та Боровський, Тасадирський та Баликбайський II породи гранодіорових масивів (утворення субплатформних умов другої інтрузивної фази). Просте зіставлення показників хімічного складу цих порід не дозволяло виконати просторову, міжкомплексну і вікову дискримінацію масивів. Поглиблений статистичний аналіз показав, що в характері розподілу титану, міді тощо простежуються певні аналогії в породах однофазних масивів за оцінками асиметрії і оцінок вірогідних концентрацій елементу, але проявляються досить виразні чіткі відмінності в різновікових утвореннях. Подальші узагальнення виявили, що статистично

виявлені відмінності для кожного з хімічних елементів дозволяють оцінювати поведінку мікро- і макрокомпонентів під час кристалізації. У випадку розсіювання елементу у всіх мінералах породи, без переважного накопичення в одному з них, очікується, що його розподіл буде нормальний. Тому стосовно цього елементу вважається, що процес кристалізації відбувається рівноважно, хімічний потенціал зберігається постійним у різних частинах розплаву протягом усього процесу кристалізації. Натомість буде спостерігатися позитивна асиметрія розподілу рідкісних елементів у акцесорних і рудних мінералах (мінералів-концентраторів). Через аналіз коефіцієнтів асиметрії A , коефіцієнтів варіації, дисперсії S , які характеризують міру розсіювання досліджуваної ознаки, можна отримати оцінку ступеня однорідності геохімічного процесу, через коефіцієнт розподілу елементів-домішок K , $K = 1 - \frac{A}{2S^2}$. При $K = 1$ система тверда-рідка магматичні фази перебувають у рівновазі; при $K < 1$ елемент перебуває у рідкій фазі; при $K > 1$ елемент перебуває у твердій фазі; при $K \gg 1$ – зростає ймовірність появи ранньомігматичних утворень; $K \ll 1$ – пізньомігматичних. Наведений приклад демонструє лише один із багатьох вагомих досягнень науковців ПНДЛ, які на сьогодні є вже загально визнаними положеннями математичної геології, прикладної геохімії та петрофізики, регіональної геології.

Тривалі і плідні роки праці Проблемної лабораторії мали нерозривний симбіотичний зв'язок з Інститутом геології Київського університету, а сформульовані нею наукові ідеї, які не втрачають своєї актуальності, і численні вихованці школи продовжують свою роботу і дотепер.

Подяка: стаття сформована головними чином за матеріалами брошури про Проблемну лабораторію,

підготовлену до 40-річної її діяльності (2008 р.), за що автор дякує своєму вчителю і науковому керівнику, професору Михайлу Івановичу Толстому.

Вибраний перелік результатів діяльності Проблемної науково-дослідної лабораторії фізико-хімічних досліджень гірських порід КНУ

Монографії: "Статистические особенности распределения химических элементов в гранитоидах" (Остафийчук И.М., Толстой М.И., 1972), "Геохимия, петрофизика и вопросы генезиса новейших вулканитов Советских Карпат" (под ред. М.И. Толстого, 1976), "Состав, физические свойства и вопросы петрогенезиса новейших вулканогенных образований Армении" (под ред. М.И. Толстого, 1980), "Петрофизика гранитоидов Украинского щита" (под ред. М.И. Толстого, 1986 р.), "Петрогеохимия и петрофизика гранитоидов Украинского щита та деякі аспекти їх практичного використання" (Толстой М.И. та ін., 2003), "Петрогеохимия, петрофизика неовулканитів Альпійської складчастої зони Східної Європи" (Толстой М.И. та ін., 2006), "Речовинний склад і петрофізичні особливості гранитоїдів Бренського і Дійського масивів (Чехія) та їх зіставлення з гранитоїдами Українського щита" (Толстой М.И., Костенко Н.В., Шабатура О.В., 2019), "Приазовський мегаблок Українського щита: тектоніка та речовинно-петрофізичні особливості гранитоїдів" (Пігулевський П.Г., Костенко Н.В., Шабатура О.В., 2021).

Кандидатські і докторські дисертації: Остафійчук И.М. (1968), Жукова М.Н. (1969), докторська Толстого М.И. (1971), Продайводи Г.Т. (1971), Сухоради А.В. (1972), Молявка В.Г. (1972), Серги А.Ю. (1978), Коболева В.П. (1984), Гожика А.П. (1994), Шабатури О.В. (2004), Костенко Н.В. (2008), докторська Шабатури О.В. (2021).

Навчальні посібники та підручники: "Основи геохімічних методів пошуку рудних родовищ" (М.И. Толстого та ін., 1976), "Основы геофизических методов разведки рудных полезных ископаемых" (М.И. Толстого та ін., 1985), "Основы геофизики (методы разведывальной геофизики)" (Толстой М.И., Гожик А.П. та ін., 2006).

Надійшла до редколегії 01.12.22

O. Shabatura, Dr. Sci. (Geol.),
E-mail: oshabatura@knu.ua;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

PROBLEM LABORATORY OF PHYSICAL AND CHEMICAL RESEARCH OF ROCKS OF TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV. 50 YEARS OF UNIVERSITY SCIENCE

The formation of the Problem laboratory of physical and chemical research of rocks of the Geological faculty (Institute of Geology) of Taras Shevchenko National University of Kyiv is closely related to the development of the geological branch of Ukraine. Many years of geochemical and petrophysical research on numerous and diverse geological objects laid the foundation for the formation of the scientific school "Applied petrogeochemistry and petrophysics of igneous rocks", under the leadership of prof. M.I. Tolstoy. The short article provides the main development milestones, the scientific and applied phasing of the Problem Laboratory, as well as an incomplete list of the achievements of the laboratory's employees and people related to it.

Keywords: geochemistry, petrophysics, geology at Kyiv university, Problem laboratory of physical and chemical research of rocks.

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.05>

А. Сухорада¹, канд. геол.-мінералог. наук, доц., ветеран університету;
О. Меньшов¹, д-р геол. наук, ст. дослідник,
E-mail: menshov.o@ukr.net;

К. Бондар¹, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.;
О. Круглов², канд. геол. наук, ст. наук. співроб.;
Р. Хоменко¹, канд. геол. наук, асист.;

С. Попов¹, канд. геол. наук;
¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
²ННЦ "Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського",
вул. Чайковська, м. Харків-24, 461024, Україна

ГЕОФІЗИКА ПЕДОСФЕРИ В КИЇВСЬКОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

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

Розглянуто розвиток досліджень геофізики педосфери у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за останні 30 років. Педосфера є унікальним та надзвичайно інформативним об'єктом з погляду геофізичних досліджень. У фізичних та хімічних властивостях об'єктів, які об'єднує в собі педосфера, проявляються пошукові ознаки покладів корисних копалин, процеси ґрунтоутворення, антропогенний вплив під час аграрного виробництва, забруднення природного навколишнього середовища, палеогеографічні процеси, історія розвитку людства як археологічна спадщина. В Україні дослідження магнетизму ґрунтового покриву розпочалося у 90-х роках ХХ століття в Київському університеті на базі Студентського конструкторсько-дослідницького бюро. На сьогодні дослідження усіх напрямів геофізики педосфери тривають. Поглиблюється розуміння фізичних основ та методологія геофізики педосфери, досліджується магнітна мінералогія ґрунтів у залежності від умов формування або привнесення: педогенез, техногенез, вплив вуглеводнів і т.ін. Нові дані одночасно верифікують вже існуючі теоретичні розробки, а також формують запитання щодо невідомих аспектів вивчення педосфери. Дослідження відбуваються як на макрорівнях у межах сільськогосподарських технологічних ділянок (полів), міських агломерацій, нафтогазоносних областей, так і на мікрорівні для найдрібніших ґрунтових агрегатів (педон), магнітних мінералів, магнітоактивних доменів тощо. Наведено результати магнітних, магнітометричних, електрометричних та георадарних досліджень у різних сферах життєдіяльності.

Ключові слова: ґрунтовий покрив, педосфера, геофізика, магнітна сприйнятливість, магнітометрія, електрометрія.

Вступ. Одним із важливих об'єктів дослідження в науках про Землю на сучасному ґносеологічному рівні є педосфера (дав.-гр. πῆδον, pedon, педон – ґрунт і дав.-гр. σφαῖρα – сфера) – як планетарна багатокомпонентна оболонка. За уявленнями сучасних ґрунтознавців, з якими погоджуються автори даної статті, терміни "педосфера" і "ґрунтовий покрив Землі" не рівнозначні ([див. <https://uk.wikipedia.org>](https://uk.wikipedia.org)). Педосфера є унікальним та надзвичайно інформативним об'єктом з погляду геофізичних досліджень. Це поверхнева оболонка Землі, що поєднує потоки речовини та енергії, що надходять на поверхню суші: екзогенні та ендегенні, абіотичні і біотичні, природні й антропогенні, що, у свою чергу, визначає формування біосферних природно-історичних тіл ґрунтового та підґрунтового екоярусів біосфери з особливим рівнем організації матерії. У науках про Землю та власне геології відбувається постійне вивчення процесів, явищ, фізичних та хімічних властивостей, які стосуються таких оболонок Землі, як літосфера, атмосфера і гідросфера. Водночас педосфера інтегрує в собі основні найважливіші ознаки всіх інших сфер. На генеральній асамблеї Європейського геонаукового союзу (EGU) відзначено, що дослідження ґрунтового покриву є ключем до розуміння більшості геологічних процесів, що відбуваються на Землі, а власне ґрунти та сформовані ними ландшафти найчастіше несуть необхідну для дослідників інформацію про поклади корисних копалин, забруднення довкілля, ерозійні процеси тощо (*Abd-Elmabod et al., 2015*).

Ефективним ключем для розуміння ендегенних та екзогенних процесів, які відбуваються в літосфері, атмосфері та гідросфері, є геофізичне вивчення саме педосфери. У фізичних та хімічних властивостях об'єктів, які об'єднує в собі педосфера (передусім ґрунтового покриву), проявляються ознаки покладів корисних копалин, процеси ґрунтоутворення, антропогенний вплив аграрного виробництва, забруднення природного навколишнього середовища, палеогеографічні процеси,

археологічні об'єкти – як відбиток історії розвитку людства. Сучасна геофізика з успіхом дозволяє ідентифікувати усі зазначені процеси та об'єкти на основі інструментальних неінвазивних технологій та моделювання. Різні моделі педосфери спрямовані на вирішення широкого кола поставлених завдань. Геофізичне моделювання педосфери пройшло шлях від певної евристичності до формування реальних та натурних моделей. При цьому автори пропонують використання динамічної моделі ґрунтового покриву, яка характеризується низкою переваг над статичною. У світовій практиці відзначається (*Mello, 2020*), що використання геофізичних методів у геології, останнім часом набуває важливого значення і для ґрунтознавства. Проте більшість досліджень зосереджені на атрибутивному моделюванні та картографуванні, і лише незначна увага приділяється розумінню процесів, що відбуваються в педосфері, а також взаємозв'язку з навколишнім природним середовищем (геологія, рельєф, геохімія та гідрологія).

Одним із найефективніших методів стали магнітні (включаючи як вивчення магнетизму природних об'єктів, так і магнітометрію), електрометрія та георадарні вишукування. Кожний із геофізичних методів, застосовуваних у дослідженні педосфери, на сьогодні перебуває на різному рівні свого розвитку та характеризується різною інформативністю залежно від завдань робіт. У той же час основною ознакою геофізичних методів у дослідженні педосфери є низька вартість, експресність, висока ефективність та неінвазивність.

Теоретичні та методологічні аспекти дослідження ґрунтового покриву за допомогою геофізичних методів належать до фундаментальної частини вивчення геофізики педосфери. Для створення загальної теорії та методології геофізичного моделювання педосфери необхідно повноцінно розуміти власне об'єкт досліджень, інформативність методів його вивчення, статичні та динамічні особливості досліджуваних геофізичних полів (*Меньшов та Сухорада, 2017*).

© Сухорада А., Меньшов О., Бондар К., Круглов О., Хоменко Р., Попов С., 2023

Історія розвитку. В Україні дослідження магнетизму ґрунтового покриву розпочалося у 90-х роках ХХ ст. в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка. Центром таких досліджень стало Студентське конструкторсько-дослідницьке бюро (СКДБ). Засновником цього напрямку є автор даної статті доцент Анатолій Васильович Сухорада, а всі інші автори – його учні. Серед перших дослідників магнітних властивостей ґрунтів слід згадати М. Гузія, А. Жадана, Д. Іваненка (*Жадан та ін., 1997*). Об'єктами досліджень стали розподіл магнітних властивостей ґрунтового покриву за їх типами, зв'язок з ґрунотвірним процесом, палеорекострукції. До співпраці та консультацій запрошувалися вчені-ґрунтознавці провідних наукових та освітніх закладів (Інститут географії НАНУ, НУБІП, ХНАУ, ННЦ "Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського"). Результатом такої роботи стали методичні численні напрацювання (*Сухорада та Гузій, 2003*), створена і продовжує поповнюватись база даних магнетизму ґрунтів України (*Сухорада та ін., 2000*). Вивчення геофізичних характеристик ґрунтового покриву було включено до навчальних програм (*Сухорада, 2002*). Результатами геофізичних досліджень педосфери, у тому числі магнітних досліджень ґрунтового покриву, стала низка захищених кандидатських, а пізніше і докторських дисертацій (К. Тяміна (Бондар), О. Круглов, О. Меньшов, Р. Хоменко, С. Попов). Як еталонні досліджувались магнітні властивості ґрунтів заповідних територій: Хомутовський степ, Михайлівська цілина, національний заповідник Асканія-Нова. З іншого боку, проводилися дослідження забруднених ґрунтів околиць міст Маріуполь та Кривий Ріг та примітивних ґрунтів, розвинених на виходах кристалічного фундаменту в межах Українського кристалічного щита.

Перед дослідниками на стартовому етапі агрогеофізичних досліджень постало три основних завдання:

1. Створення магнітної моделі ґрунтового покриву.

2. Розв'язання проблеми девіації при проведенні агромагнітометричних зйомок.

3. Створення відповідної апаратурної бази.

У 2000-х роках основну частину цих завдань було реалізовано. Змогу розвивати ці дослідження надало створенням спеціалізованого підприємства ДП "Агрогеофізика" НАК "Надра України". Досліджувались магнітні та електричні властивості ґрунтів у трьох основних напрямках: для виконання завдань геологічної розвідки, екологічних досліджень та для потреб аграрного сектору економіки – для вирішення завдань ґрунтознавства та агрономії (*Меньшов та ін., 2012*). Саме останній напрям дозволив досягти значущих результатів. Досліджуючи різні види магнітної сприйнятливості та залишкову намагніченість ґрунтового покриву, було зроблено важливі висновки в напрямках перебігу педогенезу, ерозієзнавства, прикладної агрономії.

На сьогодні за усіма зазначеними напрямками дослідження тривають. Більше уваги приділяється глибшому розумінню фізичних основ геофізики педосфери, дослідженню магнітної мінералогії ґрунтів залежно від умов формування або накопичення магнітного матеріалу: педогенез, техногенез, вплив вуглеводнів і т.д.

Далі розглянемо декілька прикладів досліджень з метою ілюстрації високої інформативності застосування геофізичних методів під час вивчення педосфери.

Ґрунтознавство та аграрне господарство. Світовий досвід вказує на ефективність застосування магнітних параметрів у дослідженні агрономічних показників родючих ґрунтів (*Pavli et al., 2022*). Як приклад наших власних досліджень в Україні розглянемо вивчення ерозії ґрунтів. Методичною основою для проведення таких досліджень є зв'язок вмісту органічної речовини та магнітної сприйнятливості (МС, χ) ґрунту. Наведений графік демонструє взаємозв'язок цих характеристик та однієї з найважливіших складових математичних моделей ерозії – топографічного фактора LS (рис. 1). Дослід виконано на схилі ділянці чорнозему опідзоленого на Харківщині.

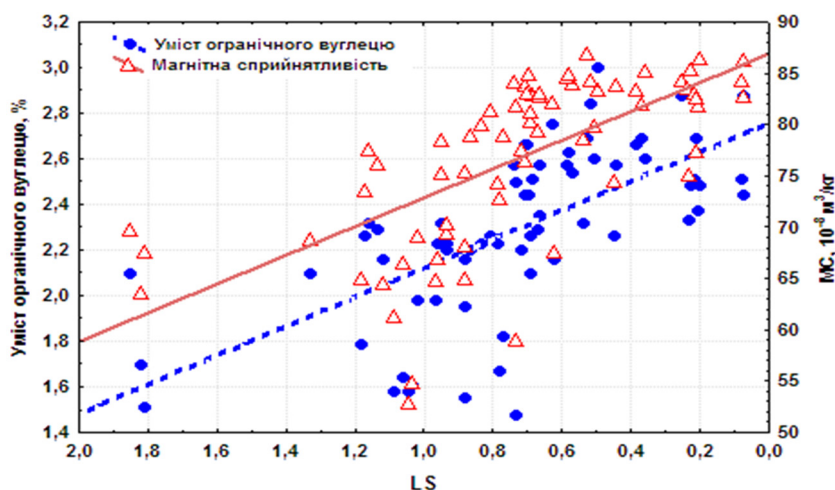


Рис. 1. Взаємозв'язок вмісту органічного вуглецю, магнітної сприйнятливості ґрунту та результатів математичного моделювання ерозії

У даному випадку коефіцієнт кореляції між досліджуваними показниками становить 0,85–0,90. Також спостерігається високий ступінь зв'язку між ними та вмістом у ґрунті фізичної глини, тобто гранулометричних часток розмірами, меншими за 0,01 мм. Подібні результати отримані і на більш великих обсягах вибірок зразків (за умови відносно простих форм схилів). Цей факт

дозволив нам рекомендувати МС для коригування результатів математичного моделювання ерозійних процесів як дешевий та швидкісний метод опробування ґрунту, який дозволяє виправляти похибки, внесені некоректними вихідними матеріалами чи змінами функціонального стану протиерозійних об'єктів (*Круглов та ін., 2020*). На черзі постало завдання дослідження зв'язку

МС з іншими ґрунтовими характеристиками, прямо чи опосередковано пов'язаними з гранулометричним складом ґрунтів чи вмістом у них органічної речовини.

Топографічне ускладнення рельєфу призводить до зниження ступеня зв'язку МС з агрофізичними ґрунтовими показниками (вміст гумусу та фізичної глини). На елювіальних ділянках ландшафту значення коефіцієнтів кореляції знижується до 0,35–0,55, досягаючи від'ємних значень на акумулятивних ділянках, особливо на гідроморфних фаціях. Для розв'язання проблеми надійності такого зв'язку проводяться дослідження, пов'язані з вивченням залежності від ступеня розвитку ерозійних процесів.

Однак навіть середня сила кореляційного зв'язку дозволяє використовувати МС ґрунту при інтерполяції даних опорних ґрунтових розрізів, передусім на елювіальних

ділянках, де спостерігається корельованість з грубизною гумусованого шару, наявністю гігморфних чи галоморфних фацій. Поряд із закономірним зниженням значень МС на змитих ґрунтах це дозволяє діагностувати менш родючі території (Крулов, 2020). Спадання значень МС сягає до 30–40 %.

Також слід відзначити можливість діагностування сторонніх включень на рекультивованих територіях. На рис. 2 показано картограму об'ємної магнітної сприйнятливості такої ділянки (чорнозем звичайний слабкозмитий, Ізюмський р-н Харківської області). У даному випадку розмах значень МС становить 25–30 %, що дозволяє впевнено діагностувати ґрунтові неоднорідності. Змитим ґрунтам відповідають значення $0,42\text{--}0,46 \cdot 10^{-3}$ од. СІ, порівняно з фоном $0,54\text{--}0,59 \cdot 10^{-3}$ од. СІ.

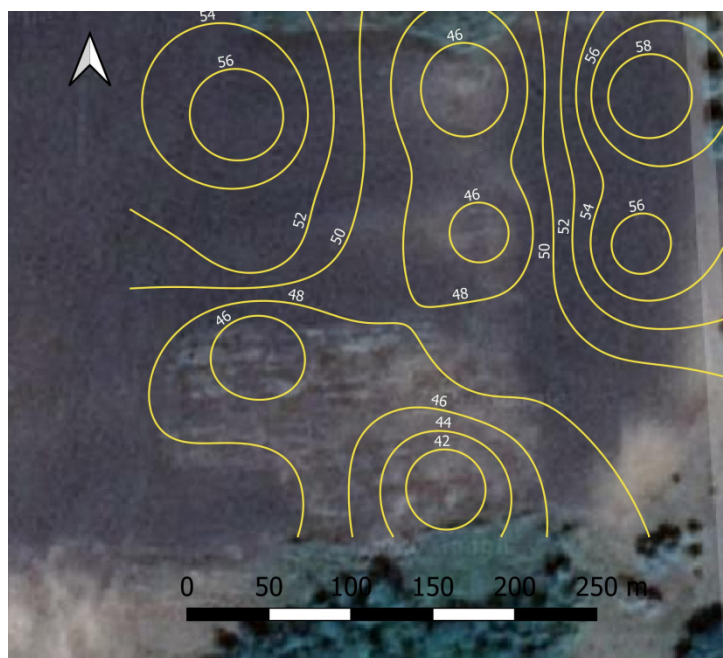


Рис. 2. Картограма магнітної сприйнятливості ґрунтів рекультивованої ділянки (розмірність МС 10^{-3} од. СІ)

Забруднення довкілля. Ще одним напрямом застосування магнітних методів є визначення забруднення довкілля, картування найбільш техногенно навантажених ділянок, ідентифікація техногенних магнітних мінералів з метою з'ясування генезису аномалій магнітних властивостей ґрунтового покриву. У роботі (Magiera et al., 2023) зазначено, що варіації мінералогічного складу, внутрішньої структури та розмірів магнітних зерен, а також стехіометрії техногенних магнітних частинок, що осідають у верхньому шарі ґрунту, можуть надати важливу інформацію, необхідну для відстеження основних джерел забруднення та розпізнавання різних технологічних процесів. В основі використання магнітного методу для картування ґрунтів урбанізованих територій лежить можливість одночасного накопичення магнітного матеріалу техногенного походження та важких металів у пилових фракціях атмосферного повітря, які у процесі своєї міграції осідають у глинистих фракціях ґрунтів (Kersten and Smedes, 2002). Наявність новоутворених магнетиків успішно може фіксуватися за допомогою вивчення петлі гістерезису, термомагнітного аналізу та різних видів залишкової намагніченості. Наприклад, для виявлення техногенного магнетиту основою є його точка Кюрі близько до 580°C та перехід Вервея в околі -150°C . Крім

того, техногенний магнетит найчастіше перебуває у мультидоменній фазі (MD), а його розміри досягають 10 мкм (PM10) і більше.

Для ілюстрації розглянемо інформативність застосування магнітних методів у практиці екологічних досліджень на прикладі міста Трускавець (Menshov et al., 2020). Метою запропонованих досліджень є оцінка його загального забруднення та визначення магнітних фаз, що відповідають за зміни магнітності ґрунту, спричинених техногенними процесами. Нами було проведено площинне вивчення магнітної сприйнятливості поруч із найбільш навантаженим автомобільним трафіком місцем Трускавець – Стебницьким кільцем (рис. 3). Максимальні значення магнітної сприйнятливості зафіксовано на відстані 0–8 м від автошляху ($\chi=95\text{--}155 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Із віддаленням у бік лісу на відстані 20–25 м від дороги магнітна сприйнятливість спадає ($\chi=35\text{--}25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), проте ще не досягає фонових значень. Для завірки априорного припущення про техногенне забруднення ґрунтів було виміряно і розраховано коефіцієнт частотної залежності магнітної сприйнятливості. Він склав $\chi_{fd}=2\text{--}3\%$, що характерно саме для забрудненого ґрунтового покриву. Скоріше за все, це магнетит у мультидоменному стані техногенного походження.

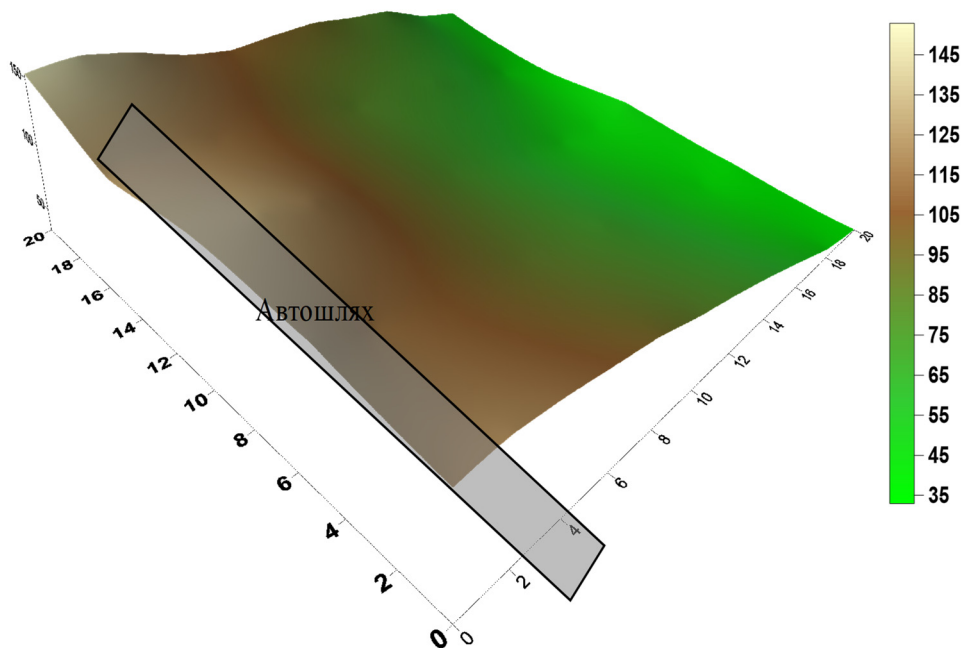


Рис. 3. Площинне вивчення магнітної сприйнятливості поруч із Стебницьким автомобільним кільцем, м. Трускавець. Осі у метрах, розмірність МС: $10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$

Для ідентифікації магнітного матеріалу, що викликає описані вище екстремуми магнітної сприйнятливості, проведено термомагнітний аналіз зразків забруднених ґрунтів. Форма кривої нагрівання (рис. 4) вказує на основну магнетитову фазу із точкою Кюрі близько до 580°C . Пік кривої поруч із відміткою у 500°C може свідчити про неоформування магнетиту із домішків сульфідів заліза. На їх наявність також вказує незначний злам у кривій нагрівання біля 300°C (рис. 4а). У той же час існування переходів за температури 300°C може інтерпретуватися не лише як наявність піротинової фази, але й вмістом

невеликої кількості однодомених зерен (Yang et al., 2016). Даний факт дозволяє стверджувати, що у зразках ґрунтів присутній магнітний матеріал первинного педогенного походження, який є основним компонентом у випадку фонових незабруднених сірих-лісових, глейових ґрунтів лісової ділянки м. Трускавець.

Високоінформативним стало низькотемпературне дослідження магнітної сприйнятливості (рис. 4б). Зафіксований перехід Вервея на відмітці у -150°C ($123,15 \text{ K}$) є однозначним підтвердженням превалювання магнетиту як основного магнетика забруднених ґрунтів м. Трускавець.

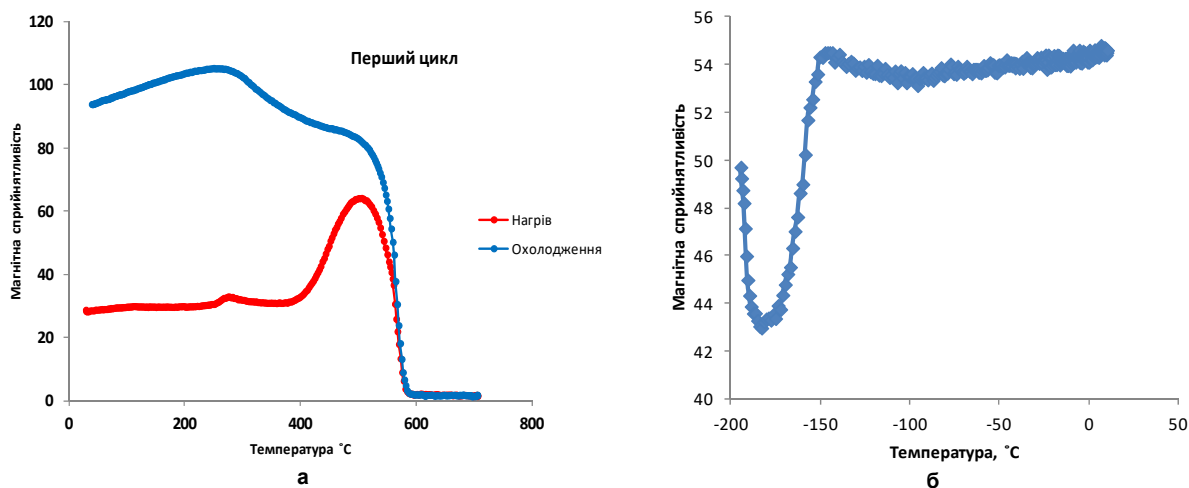
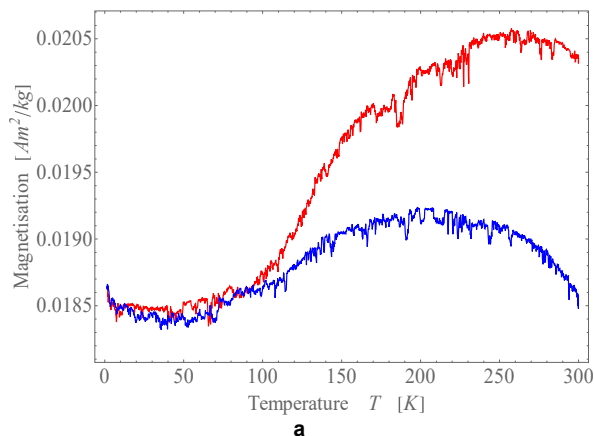


Рис. 4. Результати термомагнітного аналізу забруднених ґрунтів м. Трускавець: а – високотемпературний, б – низькотемпературний аналіз. Розмірність МС: $10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$

Температурні дослідження змін магнітної сприйнятливості є доволі складними з погляду інтерпретації отриманих результатів за рахунок існування фазових переходів магнетиків під час їх нагрівання чи охолодження. Тому для підвищення однозначності інтерпретації результатів було проведено серію вимірювань температурних змін залишкової намагніченості за допомогою магнітометричної

системи Quantum Design's MPMS 3. На рис. 5 наведено криві охолодження (ZFC) та нагріву (ZFW) зразка забрудненого ґрунту Трускавця у нульовому магнітному полі. Залишкова намагніченість отримана у полі напруженістю 7 Тл (1 RM7T) при кімнатній температурі. Для обмеження впливу магнітов'язких зерен час між намагнічуванням зразка та охолодженням складав 1 годину. Отже,

термомагнітний аналіз IRM7T реалізовувався у безперервному режимі за швидкості охолодження/нагрівання 5 K/хв (1800 точок на кривій). У результаті отримані криві ZFC і ZFW включають багато стороннього шуму, що ускладнює ідентифікацію переходів Вервея та Моріна. Тому було обчислено першу похідну різниці ZFC – ZFW із використанням фільтру (рис. 5б). Із рис. 5а видно, що



криві нагріву та охолодження розходяться на позначці близько 90 K. При цьому залишкова намагніченість після циклу охолодження нижча за початкову. Незважаючи на численні піки, що добре видні на рис. 5б, глобальний максимум ідентифікований за 127 K, що є близьким до переходу Вервея (110–125 K) та ізотропної точки магнетиту (130 K) (Özdemir and Dunlop, 1999).

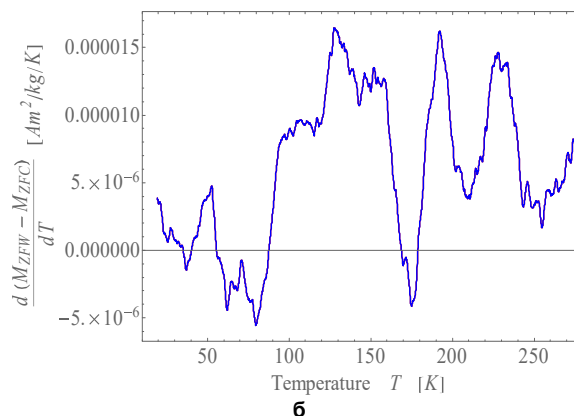


Рис. 5. Температурний аналіз залишкової намагніченості забрудненого ґрунту Трускавця: а – криві нагріву ZFW (синя) та охолодження ZFC (червона), б – перша похідна різниці ZFC – ZFW

Дані характеристики показують, що зразок включає головним чином багатодомений (MD) магнетит. Це підтверджується крутим нахилом кривої у діапазоні переходу Вервея. Крім того, IRM7T є нижчою після переходу через ізотропну точку. Це явище пов'язане з руйнуванням слабкозакріплених доменних стінок (Özdemir and Dunlop, 1999). Жодних різких змін величини залишкової намагніченості не ідентифіковано в околі ізотропної точки, що можна пояснити ступенем окиснення. Отже можна вважати, що зразок може містити і маггеміт. Таке припущення робилося нами й вище для термомагнітного аналізу магнітної сприйнятливості. Доказів наявності інших магнітних фаз (наприклад, гематиту) не виявлено.

Пошуки вуглеводнів. На даному етапі нами накопичений значущий досвід, що підтверджується теоретичними розробками та практичними матеріалами, який вказує, що пошуки покладів нафти та газу можуть бути значно інтенсифіковані та здешевлені за рахунок використання магніторозвідки у комбінації з магнітними дослідженнями гірських порід та ґрунтів. Водночас важливою є необхідність чіткого розуміння механізму новоутворення магнітних мінералів у процесі міграції вуглеводнів. Передовий міжнародний досвід вказує на важливість комплексування геофізичних, ГІС та геохімічних методів. Зокрема, за даними (De la Rosa et al., 2021), раціональним є комплекс, який об'єднує спектральний аналіз супутникових зображень, магнітні та геохімічні вимірювання гірських порід та ґрунтів (магнітна сприйнятливість, ізоермічна залишкова намагніченість насичення, аналіз кривих гістерезису, спектро-радіометрія поглинання та рентгенівський дифракційний аналіз).

Магнітні властивості ґрунтів часто є вищими (буває і навпаки) від підстильних формацій. Тому слід розрізняти магнітний сигнал від ґрунтів, що пов'язується з безпосереднім впливом флюїду, та магнітний сигнал, сформований природним (педогенним) магнетизмом ґрунтів. Для глибокого розуміння фізико-хімічних процесів, які ведуть до зміни магнітної мінералогії гірських порід та ґрунтів у зоні впливу вуглеводнів, побудовані детальні моделі на атомарно-молекулярному рівні (Menshov et al., 2015).

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

Таким чином, магнітні дослідження педосфери при пошуках нафти і газу включають два напрями. Перший – це прямопошуковий метод, пов'язаний із вивченням безпосередніх змін магнітних властивостей ґрунтів та нижчезалягаючих порід під впливом міграції вуглеводнів. Другий – це врахування ґрунтових та ландшафтних аномалій для розрізнення аномального сигналу від ґрунтів та інших джерел (розломи, балки та інші геологічні глибокозалегаючі структури) під час магніторозвідки на нафту і газ.

Як приклад для ілюстрації результатів наших досліджень звернемося до вивчення ділянки покладів вуглеводнів біля селища Балабанівка Богодухівського району Харківської області (більш детально див. Menshov, 2022). Досліджувалась колекція зразків ґрунту, що представлена чорноземами глибокими середньогумусними, які відбиралися у межах ареалів впливу свердловин Недільна-1 (продуктивна) та Недільна-2 (непродуктивна). У лабораторних умовах визначено питому магнітну сприйнятливості та її частотну залежність. Паралельно відбувалися дослідження атмогеохімічним методом фахівцями Інституту геологічних наук НАН "України" (І.Д. Багрій). Зокрема, визначено вміст гексану. Карту розподілу магнітної сприйнятливості ґрунтів із використанням методу інтерполяції IDW у середовищі ArcGIS наведено на рис. 6. На рис. 7 наводиться карта розподілу гексану для тих самих точок дослідження.

Як видно з рисунків 6 та 7 закономірності просторового розподілу значень магнітної сприйнятливості та вмісту гексану мають ряд спільних рис. Так, у західній частині відзначаються області збігів підвищених значень магнітної сприйнятливості та понижених значень вмісту гексану. Поруч із продуктивною свердловиною

Недільна-1 зафіксовано підвищені значення МС, а в околі непродуктивної Недільна-2 значення МС є середніми за величиною. Для вмісту гексану біля обох свердловин фіксуються максимуми.

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

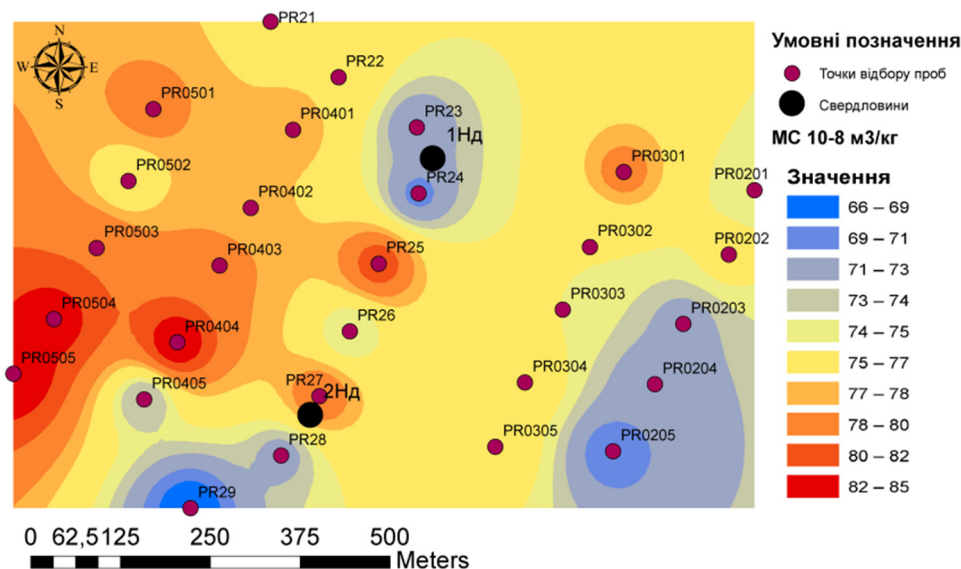


Рис. 6. Карта розподілу магнітної сприйнятливості ґрунтів

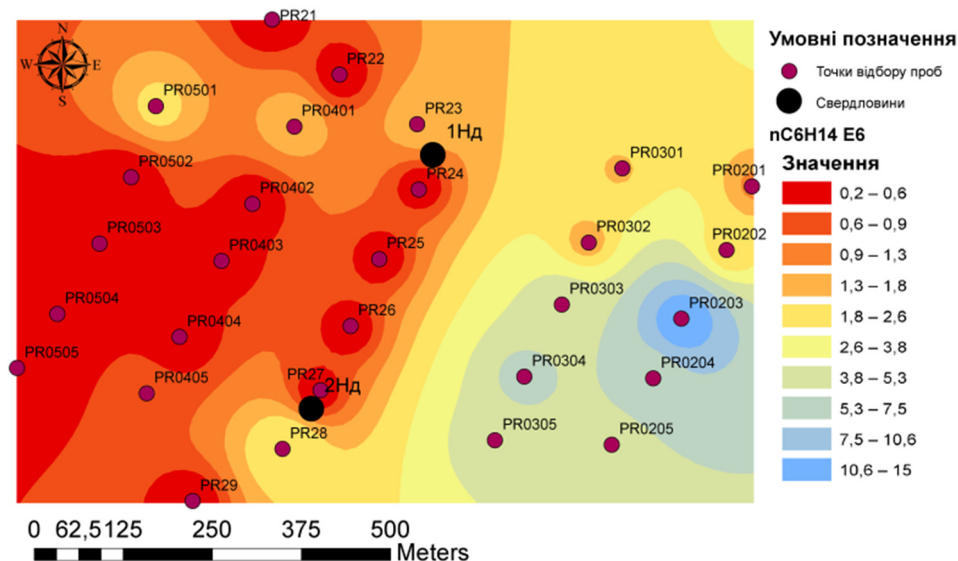


Рис. 7. Карта розподілу вмісту гексану у ґрунтах

Загальна картина розсіювання гексану у зразках ґрунтів, як і розподіли магнітної сприйнятливості, є доволі складною для інтерпретації. Пояснюється це фізико-хімічними особливостями міграції вуглеводневого флюїду у верхні горизонти геологічного розрізу та ґрунтового покриву. Водночас слід враховувати гало (haloe) ефект, природний магнетизм ґрунтів, ландшафтні особливості та геологічну будову території. Феромагнітні мінерали гірських порід та ґрунтів за межами зони покладу меншою мірою піддаються хімічному впливу і зберігаються в первісному вигляді. Такі епігенетичні перетворення приводять до перерозподілу намагніченості природних об'єктів у склепінні структури і на її флангах, що створює сприятливі передумови для відображення у магнітному полі (Безукладнов и Мавричев, 1997). У

даному прикладі аналізується зв'язок магнітної сприйнятливості із гексаном С6Н14. Відомо (Баєрій та ін., 2013), що вуглеводні С5-С8 і важчі гомологи типові тільки для нафти, але їх міграційні можливості обмежені у зв'язку з великою молекулярною вагою. Раніше вважалося, що вони можуть зустрічатися тільки в районах з інтенсивною вертикальною міграцією зонами тектонічних порушень. Проте, за більш новими даними (Исаев и др., 2009), під час геохімічних досліджень Західносибірської плити успішну розвідку покладів вуглеводнів без буріння було проведено на основі аналізу аномалій важких С10-С14 ароматичних вуглеводнів, а не як раніше за аномаліями вуглеводневих та інших газів або за складом важких алканових вуглеводнів. Результати дослідження виявили кільцеві зони аномалій концентрацій важких вуглеводнів,

які збігаються у латеральному напрямку із положенням водно-нафтового контакту нафтових покладів. Отже, важкі вуглеводні утворюють стійкі аномальні зони концентрацій у приповерхневих відкладах та ґрунтовому покриві, які пов'язані із продуктивними пластами нафти і газу, і як підтверджує наведений нами приклад, можуть фіксуватися магнітними методами. Вуглеводні та продукти їх окиснення мають значну міграційну рухливість, що призводить до формування аутогенних магнітних мінералів від зони власне покладу до ґрунтового покриву, що проявляється у вигляді аномальних значень магнітної сприйнятливості, залишкової намагніченості та інших магнітних параметрів.

Археологічні дослідження. Ґрунтовий покрив є тим субстратом, на якому живе людина, веде господарську діяльність і розвиває свою культуру протягом тисячоліть свого існування. Ґрунт зберігає в собі матеріальні сліди розвитку людства, які, у свою чергу, впливають на його фізичні властивості і фізико-хімічні показники. Відзначається (Grison et al., 2022), що геофізичні методи можуть неінвазивним способом виявити структури та об'єкти, пов'язані з минулими поселеннями, а вимірювання магнітної сприйнятливості є важливим для ідентифікації археологічних об'єктів у межах високомагнітних ділянок для розрізнення природних і антропогенних факторів. Останні 15 років у Київському університеті проводяться дослідження з виявлення археологічних об'єктів і картування пам'яток за допомогою неруйнівних геофізичних методів, а також здійснюються дослідно-методичні розробки щодо створення і удосконалення археолого-геофізичних технологій. Наразі раціональний комплекс польових методів включає високоточну магнітометрію, томографію електричного опору (ТЕО) та георадіолокацію (георадарне сканування).

Кожен із методів чутливий до змін певної фізичної властивості ґрунтового середовища, яке перебувало під антропогенним впливом у минулому. Зокрема, застосування вогню призводить до зростання намагніченості речей і об'єктів, виготовлених з глини, ґрунту або вирізаних у лесоподібному суглинку – типовій материковій породі на давніх поселеннях, городищах і могильниках в українському лісостепі. На рис. 8 представлено карту магнітних аномалій виробничої частини поселення черняхівської культури Війтенки, що на Харківщині. Археологічні дослідження показали, що яскраві позитивні аномалії, які мають форму округлих плям з негативним "гало" з північного боку, спричинені гончарними горнами. Як бачимо, магнітний метод незамінний при археологічному картуванні поселень, де, таким чином, знаходять пічки, горни, обпалені житла, скупчення кераміки тощо.

Не менш важливим є інший механізм формування магнітних аномалій – шляхом поступового заповнення або затікання ґрунтом негативних форм рельєфу, вирізаних у материк (земляних жител, ровів, ям тощо). До прикладу, за цим механізмом утворилися характерні аномалії на місцях курганів скіфського часу. Наразі навіть повністю знівельовані кургани впевнено визначаються у просторі завдяки аномаліям від кільцевих ровів і досить часто – пограбованих поховальних катакомб. На рис. 9 представлено фрагменти магнітної карти курганного могильника Катеринівка з курганами різних розмірів.

За 15 років виконано високоточні магнітні знімання на п'яти десятках пам'яток, застосувавши для цього сучасні цезієві магнітометри. Нами розроблена спеціалізована методика польових магнітометричних досліджень археологічних пам'яток та оригінальне програмне забезпечення

для обробки та інтерпретації даних вимірювань (Бондар та ін., 2019).

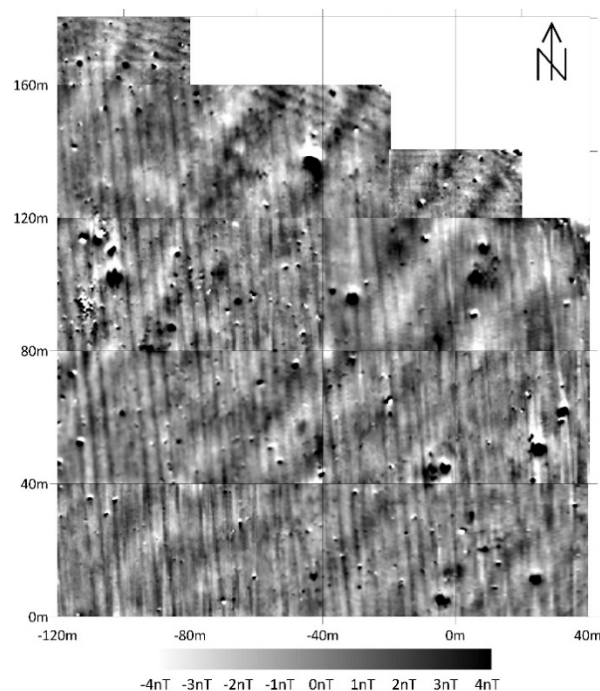


Рис. 8. Карта магнітних аномалій поселення пізньоримського часу Війтенки (Харківська обл.) (Bondar and Liubichev, 2014)

Важливою фізичною властивістю середовища є питомий електричний опір, за яким у товщі ґрунту впевнено виявляються кам'яні споруди і різні порожнини, опір яких суттєво вищий за ґрунти, або навпаки – зволожені ділянки, де опір спадає. У 2011–2012 рр. було розроблено устаткування для електророзвідки методом ТЕО на постійному струмі для дослідження вертикальної структури культурних шарів (Хоменко та ін., 2013). Прикладом застосування цієї установки є археолого-геофізична модель кургану Новоселицька могила (Полтавська обл.), у структурі якого виявлено два ймовірно різночасові насипи та за високоомними аномаліями передбачається, що це поховання у кам'яних скринях (рис. 10).

Десять років тому ми розпочали застосування георадарних технологій з використанням георадарів серії VIY українського виробника Transient technologies. Вивчення ефективності роботи цих приладів на різних типах ґрунтів дозволило окреслити коло завдань, які успішно вирішуються в українському степу і лісостепу на лесоподібних суглинках і супісках, а також дозволили суттєво просунутись у неінвазивних обстеженнях архітектурних споруд. Зокрема, на рис. 11 представлено радарограми з ділянки у Митрополичому саду Києво-Печерської лаври. Профілі перетинають старі розкопи, порушені зони, комунікації та археологічні об'єкти XII ст., інтерпретація яких підтверджена розкопками.

Крім того, у рамках георахеологічних проєктів проводяться дослідження геологічної будови природно-культурних ландшафтів, зокрема карстових печер (Bondar et al., 2021), вивчаються фізичні властивості ґрунтів та печерних відкладів, іде робота над проблемою комплексування геофізичних методів для отримання різномасштабної інформації на складнобудованих багатошарових пам'ятках (Бондар та ін., 2022). Всі дослідження на об'єктах історико-культурної спадщини

проводяться в активній співпраці з археологами та істориками з Інституту археології НАН України, Інституту історії НАН України, ДП "Рятівна археологічна служба", історико-культурними заповідниками та музеями в різних областях України. Археолого-геофізична наукова

група здійснила серію проєктів, які мали широкий суспільний резонанс, таких як пошуки поховання Б. Хмельницького в Суботові, дослідження масових поховань Холокосту, локалізація Мельгуновського кургану під Кропивницьким тощо.

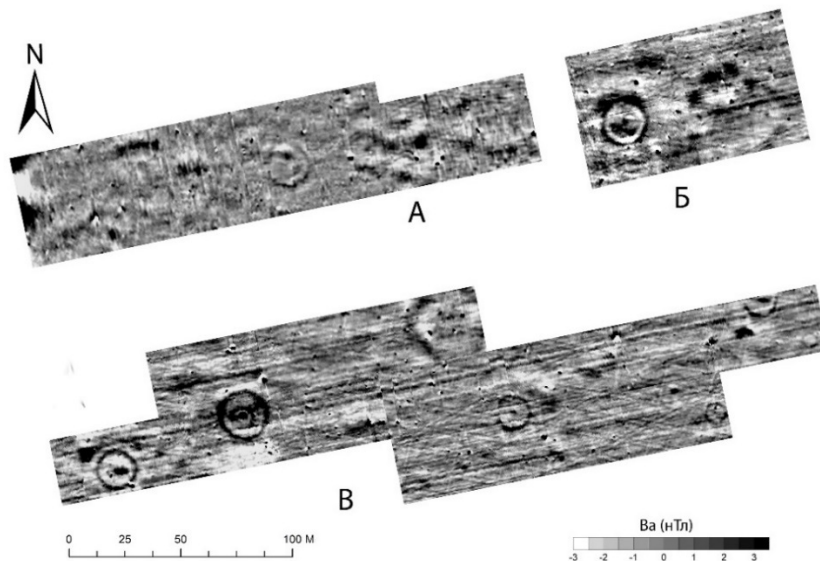


Рис. 9. Карти аномалій магнітного поля ділянок курганного могильника Катеринівка (Дніпропетровська обл.) (Бондар та ін., 2019)

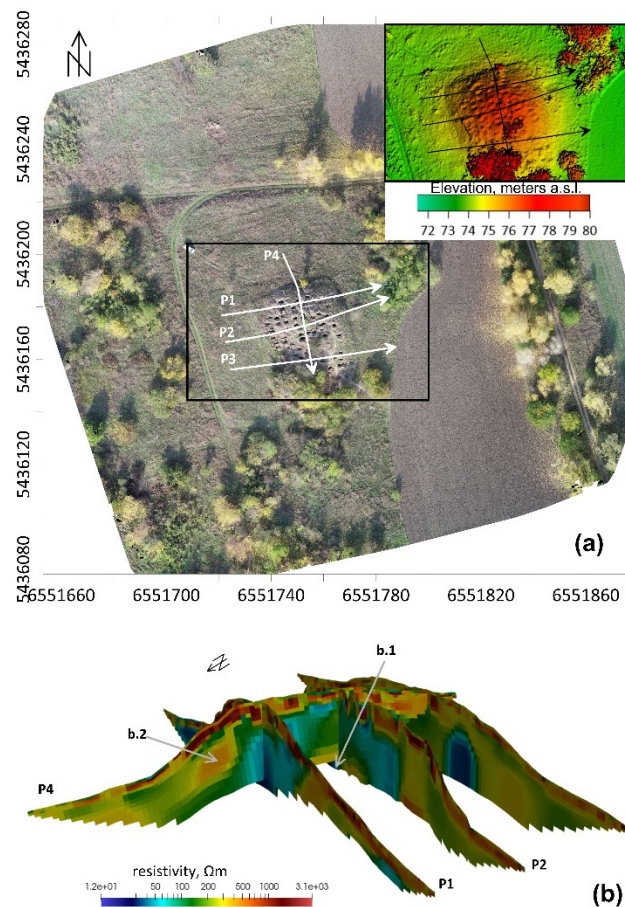


Рис. 10. Ортофотоплан, цифрова модель рельєфу (а) та геоелектрична модель кургану (б) Новоселицька могила (Полтавська обл.) доби бронзи – раннього залізного віку. Стрілки вказують на передбачувані поховання у кам'яних скринях

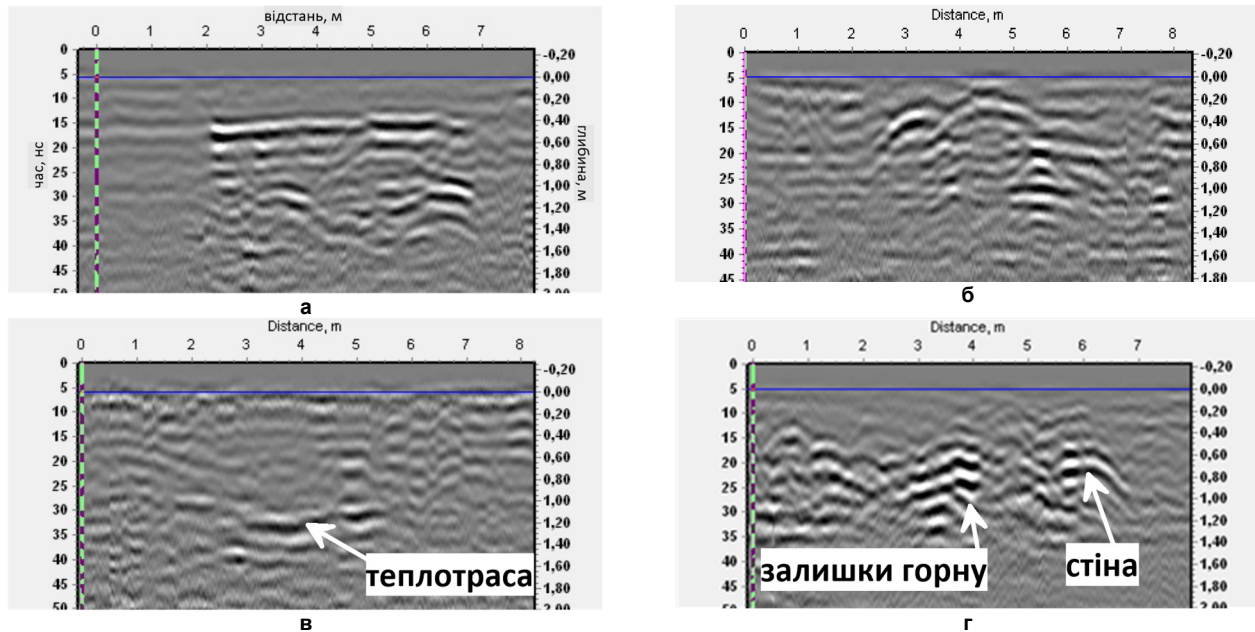


Рис. 11. Приклади радарограм, отриманих в Митрополичому саду Києво-Печерської Лаври (Bondar and Taranenko, 2021): а – аномалія від старого розкопу, законсервованого піском та ПВХ-панелями; б – кілька гіпербол від окремих кам'яних брил і фрагментів будівельного сміття; в – теплотраса; г – залишки горну та фортечного муру (стіни) XII ст.

Електрометрія та магнітометрія ґрунтового покриття. Активно проводяться дослідження ґрунтового покриття методами електрометрії та магнітометрії. Водночас використовуються як польові методи досліджень, так і вимірювання фізичних параметрів зразків ґрунтового матеріалу в лабораторних умовах. Згідно з (Carrera et al., 2022), досягнення стабільного стану ґрунтового покриття пов'язане з оптимальним вибором агрономічних процедур у межах конкретної ділянки. Також пропонується застосування методів електротомографії (ERT) та електромагнітної індукції (EMI) для моніторингу впливу традиційних і консервативних агрономічних методів оцінки стану родючих земель.

Розглянемо приклади власних досліджень для території України. Електрометричні дослідження реалізовано на методі опору на постійному та змінному струмі. При

цьому методика враховує специфіку об'єкта досліджень. Зокрема при БЕЗ початкові розноси вибираються з мінімальною відстанню. Відібраний значущий матеріал дозволив провести класифікацію типів ґрунтових розрізів за характером кривих БЕЗ. Для досліджень залучено першу і єдину власну розробку електротомографічної установки в Україні. Установка працює як на постійному, так і на змінному струмах. Окрім позірного опору, вона дозволяє вимірювати поляризованість ґрунтового розрізу для різних глибин. Для розрахунку параметрів поляризації вимірювання виконуються на низьких частотах із записом сигналу в приймальній лінії MN та подальшою фільтрацією сигналу. Глибинність досліджень варіює від 3 м до 24 м залежно від відстані між живлячими електродами. Детальність сягає 10 см – 1 м відповідно. Приклади електричних розрізів наведено на рис. 12.

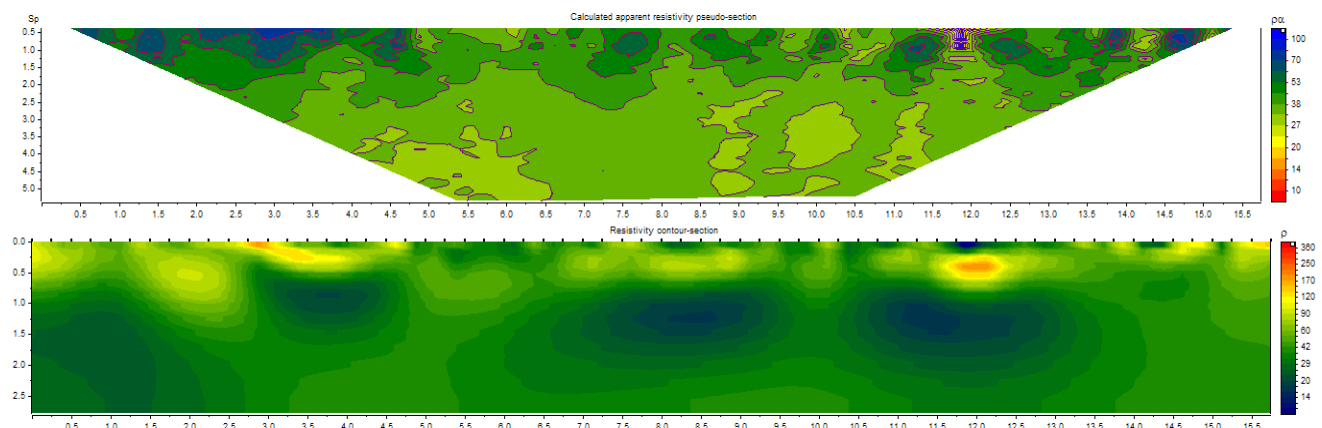


Рис. 12. Результати електротомографічних досліджень території кладовища м. Новомиргород

використання магнітометричних досліджень при вивченні природних об'єктів вимагало перегляду попередніх методичних та апаратних постулатів. Зокрема було доведено необхідність проведення ультрадетальної (крок досліджень – перші десятки см), високодискретної та

високоточної зйомки, а отже – розробки відповідної апаратури. На базі кафедри геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка розроблено і впроваджено високоточні та швидкодіючі реєстратори магнітного поля (як одноканальні, так і двоканальні

варіанти). Швидкодія розроблених приладів становить 10 і більше вимірів за секунду за роздільної здатності 0,05 нТл, що є достатнім для вирішення широкого кола завдань геології, інженерної геології, археології, екології.

Особливу увагу приділено методичним дослідженням магнітного поля ґрунтового покриття. При обробці матеріалів досліджень виявлено відмінність значень магнітного поля за частотними характеристикам (рис. 13). Зокрема, фіксується зростання частотної дисперсії для ряду ґрунтів дерново-підзолисті – сірі-лісові – чорноземи. Крім того, виявлено суттєвий вплив на амплітудно-частотні характеристики магнітного поля механічної переорієнтації часток ґрунту. Це проявляється в

ускладненні характеру магнітного поля після механічної обробки території. Методичні роботи дозволили виявити дещо відмінний характер просторово-часових змін варіацій магнітного поля від загальноприйнятих, що вказує на необхідність зменшення відстані розташування магнітотваріаційної станції від ділянки досліджень.

Перспективним, на нашу думку, є вимірювання змін магнітного поля в шурфах. Зокрема порівняння проведених модельних розрахунків показує можливість альтернативного розрахунку магнітних параметрів ґрунтового розрізу у разі детального вимірювання магнітного поля у шурфах.

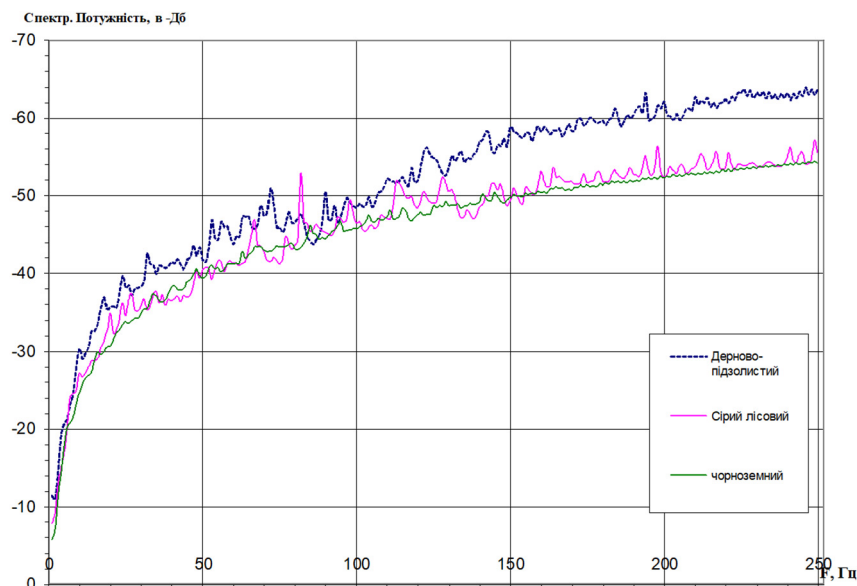


Рис. 13. Порівняльний графік осереднених спектрів магнітного поля для основних генетичних типів ґрунтів України

Висновки та перспективи розвитку. Як показують результати теоретичних розробок та практичної реалізації, педосфера є унікальним об'єктом, дослідження якого геофізичними методами надає цінну інформацію щодо ґрунотвірних процесів, антропогенного впливу в агрономії, техногенного забруднення, пошуків корисних копалин, моніторингу небезпечних геологічних процесів, дослідження археологічної спадщини. Водночас нові дані одночасно як верифікують вже існуючі теорії, так і поглиблюють ще не пізнані аспекти вивчення педосфери, ставлять нові виклики. Дослідження відбувається як на макрорівнях (аграрні поля, міські агломерації, нафтогазоносні області), так і на мікрорівні для найдрібнішого ґрунтового агрегату (педон), магнітних мінералів, магнітоактивних доменів тощо. На нашу думку, попри суттєвий доробок за останні 30 років, ми все ще перебуваємо лише на початковому етапі дослідження педосфери як об'єкта та потенціалу геофізичних методів для її розуміння як інструмента.

Перспективи розвитку геофізики педосфери пов'язані з низкою завдань. Паралельно з визначенням родючості ґрунтів важливим є визначення гальмування життєвих функцій ґрунтових агрегатів, у зв'язку із впливом гербіцидів. Наступне завдання – формування чітких критеріїв застосування геофізичних методів дослідження педосфери під час пошуків вуглеводнів. Також перспективним є дослідження змін, пов'язаних з вологістю ґрунтів, водоносними горизонтами, водною ерозією як базисом для формування зсувів. Важливими є і

фундаментальні завдання, зокрема, дослідження динаміки педосфери, чітке визначення її границь (глибина проникнення коренів рослин, перший від поверхні водонесний горизонт), глобалізація розуміння на рівні макрорландшафту. Крім того, військові дії, на жаль, відкривають цілий напрям нових завдань, що стосуються колосального зараження педосфери, втрати родючих земель та необхідності виявлення масового замінування території. Усі окреслені перспективні напрями, на нашу думку, потребують використання дешевих, експресних та технологічних геофізичних методів.

Список використаних джерел

- Багрий, І.Д., Грига, М.Ю., Войцицький, З.Я., Аксьом, С.Д., Мамишев, І.Є. (2013). Прогнозування покладів вуглеводнів на структурі Глибока за результатами структурно-термо-атмогеохімічних (стаг) досліджень. *Геологія і полезні ископаемые мирового океана*, 4(34).
- Безукладнов, В.А., Мавричев, В.Г. (1997). Выявление аномалий типа "залеж" по магнитному полю. *Геология нефти и газа*, (6), 25–29.
- Бондар, К.М., Дараган, М.М., Прилуков, В., Полін, С.В., Цюпа, І.В., Діденко, С.В. (2019). Магнітометрія скіфського курганного могильника Катеринівка у Нижньому Подніпров'ї. *Геофізичний журнал*, 41, 134–152.
- Бондар, К.М., Вишва, С.А., Шейко, І.М., Козленко, Р.О. (2022). Польові методи археологічної геофізики в світі і в Україні: витоки, становлення, сучасність. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 99(4), 12–24.
- Жадан, А., Сухорада, А., Тютюнник, Д. (1997). Магнітні властивості ґрунтів України та деякі аспекти їх інтерпретації. *Актуальні проблеми екогеології України*, 48.
- Исаев, В.И., Коржов, Ю.В., Лобова, Г.А., Ярков, Д.М. (2009). Геохимическая оценка нефтегазоносности локальных ловушек. *Геоинформатика*, (2), 54–61.
- Круглов, О.В., Коляда, В.П., Ачасова, А.О., Шевченко, М.В., Назарок, П.Г. (2020). До питання дослідження інформаційного забезпечення

створення сталих агроландшафтів. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 34, 184–193.

Круглов, О.В. (2020). Магнітометрія ґрунтів у діагностуванні деградаційних процесів. *Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. зб.*, 90, 29–35. doi: <https://doi.org/10.31073/acss90-03>

Меньшов, О.І., Сухорада, А.В., Хоменко, Р.В., Круглов, О.В. (2012). Сучасні магнітні дослідження природних об'єктів. Інформаційний аспект. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 9, 178–185.

Меньшов, О., Сухорада, А. (2017). Основи теорії та методології геофізики ґрунтового покриву: перші результати практичного застосування. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79(4), 35–39.

Сухорада, А.В., Круглов, О.В., Жадан, А.М., Меньшов О.І. (2000). Попередні результати дослідження педомагнітних особливостей ґрунтового покриву державного агрогеофізичного полігону. *Матеріали міжнародної наукової конференції "Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища"*, 57–58.

Сухорада, А.В. (2002). Конверсія прикладної геофізики та її "екологізація" – навчально-методичні аспекти. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 23–24, 32–34.

Сухорада, А.В., Гузій, М.І. (2003). Магнітометрія в агрогеофізиці. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 26–27, 27–28.

Хоменко, Р., Бондар, К., Попов, С. (2013). Нова малоглибинна багатоелектродна установка вимірювання електричного опору. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(61), 36–40.

Abd-Elmabod, S.K., Jordán, A., Fleskens, L., Van der Ploeg, P., Muñoz-Rojas, M., Anaya-Romero, M., Van der Salm, R.J., De la Rosa, D. (2015). Modelling agricultural suitability along soil transects under current conditions and improved scenario of soil factors. *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-1012-2.

Bondar, K., Taranenko, S. (2012). The effectiveness of ground-penetrating radar surveys on the territory of Kyiv-Pechersk Lavra. Conference *Proceedings of XV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*.

Bondar, K., Liubitchev, M. (2014). Magnetic prospecting of Late-Roman time – beginning of the Great Migration Period settlement and cemetery Vojtenki (Eastern Ukraine). *Abstracts of 20-th annual meeting of European Association of Archaeologists, Istanbul, Turkey, 10-14 September 2014*, 189.

Bondar, K.M., Sokhatskyi, M.P., Chernov, A., Popko, Ya., Petrokushyn, O., Baryshnikova, M., Khomenko, R., Boyko, M. (2021). Geophysical assessment of Verteba Cave Eneolithic site, Ukraine. *Geoarchaeology*, 36, 238–251.

Carrera, A., Longo, M., Piccoli, I., Mary, B., Cassiani, G., & Morari, F. (2022). Electro-Magnetic Geophysical Dynamics under Conservation and Conventional Farming. *Remote Sensing*, 14(24), 6243.

De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Yopez, S., & Amon, C. (2021). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103036.

Grisson, H., Klanica, R., Stejskalová, Š., Šteffl, J. (2022). Geoelectric, magnetic susceptibility, and geochemical survey as a tool to clarify the origin of Bronze Age water reservoirs at the Štěpánov hillfort, Czechia. *CATENA*, 213, 106192.

Kersten, M., Smedes, F. (2002). Normalization procedures for sediment contaminants in spatial and temporal trend monitoring. *Journal of Environmental Monitoring*, 4(1), 109–115.

Magiera, T., Górka-Kostrubiec, B., Szumiata, T., Bućko, M. S. (2023). Technogenic magnetic particles in topsoil: Characteristic features for different emission sources. *Science of The Total Environment*, 865, 161186.

Mello, D.C.D. (2020). Geophysics techniques on the evaluation of natural processes in the pedosphere, at different pedoenvironment and its contribution for digital soil mapping. *Thesis ... Dr. Sci.*, Universidade de São Paulo.

Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.

Menshov, O., Spassov, S., Camps, P., Vyzhva, S., Pereira, P., Pastushenko, T., Demidov, V. (2020). Soil and dust magnetism in semi-urban area Truskavets, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 79(8), 182.

Menshov O. (2022). Magnetic mineralogical analysis of soils as a part of the integrated geological and geophysical model for the hydrocarbon prospecting. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 97, 2, 39–43.

Özdemir, Ö., Dunlop, D.J. (1999). Low-temperature properties of a single crystal of magnetite oriented along principal magnetic axes. *Earth and planetary science letters*, 165(2), 229–239.

Pavlu, L., Kodešová, R., Vašát, R., Fér, M., Klement, A., Nikodem, A., Kapička, A. (2022). Estimation of the stability of topsoil aggregates in areas affected by water erosion using selected soil and terrain properties. *Soil and Tillage Research*, 219, 105348.

Yang, P., Byrne, J.M., Li, H., Shao, H.B. (2016). Evaluation of semi-arid arable soil heavy metal pollution by magnetic susceptibility in the Linfen basin of China. *Arid Land Research and Management*, 30(3), 258–268.

References

Abd-Elmabod, S.K., Jordán, A., Fleskens, L., Van der Ploeg, P., Muñoz-Rojas, M., Anaya-Romero, M., Van der Salm, R.J., De la Rosa, D. (2015). Modelling agricultural suitability along soil transects under current conditions and improved scenario of soil factors. *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-1012-2.

Bagriy, I.D., Griga, M.Yu., Voytsitsky, Z.Ya., Aksyom, S.D., Mamyshev, I.E. (2013). Prediction of hydrocarbon deposits on the Hlybok structure based on the results of structural-thermo-atmogeochimical (stag) studies. *Geology and minerals of the world ocean*, 4(34). [In Ukrainian]

Bezukladnov, V. A., Mavrychev, V. G. (1997). Detection of anomalies of the "depend" type on the magnetic field. *Geology of oil and gas*, (6), 25–29. [In Russian]

Bondar, K., Taranenko, S. (2012). The effectiveness of ground-penetrating radar surveys on the territory of Kyiv-Pechersk Lavra. Conference *Proceedings of XV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*.

Bondar K., Liubitchev M. (2014). Magnetic prospecting of Late-Roman time – beginning of the Great Migration Period settlement and cemetery Vojtenki (Eastern Ukraine). *Abstracts of 20-th annual meeting of European Association of Archaeologists, Istanbul, Turkey, 10–14 September 2014*, 189.

Bondar, K.M., Sokhatskyi, M.P., Chernov, A., Popko, Ya., Petrokushyn, O., Baryshnikova, M., Khomenko, R., Boyko, M. (2021). Geophysical assessment of Verteba Cave Eneolithic site, Ukraine. *Geoarchaeology*, 36, 238–251.

Bondar, K.M., Daragan, M.M., Prylukov, V., Polin, S.V., Tsyupa, I.B., Didenko, S.V. (2019). Magnetometry of the Scythian burial mound of Katerynivka in Nizhny Podniprova. *Geophysical Journal*, 41, 134–152. [In Ukrainian]

Bondar K.M., Vyzhva S.A., Sheyko I.M., Kozlenko R.O. (2022) Field methods of archaeological geophysics in the world and in Ukraine: origins, development, modernity. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 99(4), 12–24. [In Ukrainian]

Carrera, A., Longo, M., Piccoli, I., Mary, B., Cassiani, G., & Morari, F. (2022). Electro-Magnetic Geophysical Dynamics under Conservation and Conventional Farming. *Remote Sensing*, 14(24), 6243.

De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Yopez, S., Amon, C. (2021). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103036.

Grisson, H., Klanica, R., Stejskalová, Š., Šteffl, J. (2022). Geoelectric, magnetic susceptibility, and geochemical survey as a tool to clarify the origin of Bronze Age water reservoirs at the Štěpánov hillfort, Czechia. *CATENA*, 213, 106192.

Isaev, V.I., Korzhov, Yu.V., Lobova, G.A., Yarkov, D.M. (2009). Geochemical assessment of oil and gas capacity of local traps. *Geoinformatics*, (2), 54–61. [In Russian]

Kersten, M., Smedes, F. (2002). Normalization procedures for sediment contaminants in spatial and temporal trend monitoring. *Journal of Environmental Monitoring*, 4(1), 109–115.

Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). A new shallow multi-electrode installation for measuring electrical resistance. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(61), 36–40. [In Ukrainian]

Kruglov, O.V., Kolyada, V.P., Achasova, A.O., Shevchenko, M.V., Nazarov, P.G. (2020). To the issue of research on information support for the creation of sustainable agrolandscapes. *Man and environment. Problems of neoecology*, 34, 184–193. [In Ukrainian]

Kruglov, O.V. (2020). Soil magnetometry in diagnosing degradation processes. *Agrochemistry and soil science*, 90, 29–35. [In Ukrainian]

Magiera, T., Górka-Kostrubiec, B., Szumiata, T., Bućko, M. S. (2023). Technogenic magnetic particles in topsoil: Characteristic features for different emission sources. *Science of The Total Environment*, 865, 161186.

Mello, D.C.D. (2020). Geophysics techniques on the evaluation of natural processes in the pedosphere, at different pedoenvironment and its contribution for digital soil mapping. *Thesis ... Dr. Sci.*, Universidade de São Paulo.

Menshov, O.I., Sukhorada, A.V., Khomenko, R.V., Kruglov, O.V. (2012). Modern magnetic studies of natural objects. Information aspect. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, 9, 178–185. [In Ukrainian]

Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.

Menshov, O., Sukhorada, A. (2017). Basic theory and methodology of soil geophysics: the first results of application. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 79(4), 35–39. [In Ukrainian]

Menshov, O., Spassov, S., Camps, P., Vyzhva, S., Pereira, P., Pastushenko, T., Demidov, V. (2020). Soil and dust magnetism in semi-urban area Truskavets, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 79(8), 182.

Menshov O. (2022). Magnetic mineralogical analysis of soils as a part of the integrated geological and geophysical model for the hydrocarbon prospecting. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 97, 2, 39–43.

Özdemir, Ö., Dunlop, D.J. (1999). Low-temperature properties of a single crystal of magnetite oriented along principal magnetic axes. *Earth and planetary science letters*, 165(2), 229–239.

Pavlu, L., Kodešová, R., Vašát, R., Fér, M., Klement, A., Nikodem, A., Kapička, A. (2022). Estimation of the stability of topsoil aggregates in areas

affected by water erosion using selected soil and terrain properties. *Soil and Tillage Research*, 219, 105348.

Sukhorada, A.V., Kruglov, O.V., Zhadan, A.M., Menshov O.I. (2000). Preliminary results of the study of pedomagnetic characteristics of the soil of the state agrogeophysical polygon. Conference *Proceedings of International Scientific Conference "Geophysical monitoring of dangerous geological processes and the ecological state of the environment"*, 57–58. [In Ukrainian]

Sukhorada, A.V. (2002). Conversion of applied geophysics and its "greening" – educational and methodological aspects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 23-24, 32–34. [In Ukrainian]

Sukhorada, A.V., Guziy, M.I. (2003). Magnetometry in agrogeophysics. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 26–27, 27–28. [In Ukrainian]

Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). A new shallow multi-electrode installation for measuring electrical resistance. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(61), 36–40. [In Ukrainian]

Yang, P., Byrne, J.M., Li, H., Shao, H.B. (2016). Evaluation of semi-arid arable soil heavy metal pollution by magnetic susceptibility in the Linfen basin of China. *Arid Land Research and Management*, 30(3), 258–268.

Zhadan, A., Sukhorada, A., Tyutyunnyk, D. (1997). Magnetic properties of the soils of Ukraine and some aspects of their interpretation. *Actual problems of ecogeology of Ukraine*. 48. [In Ukrainian]

Надійшла до редколегії 12.01.23

¹A. Sukhorada, PhD (Geol.), Associate Prof., University Veteran;

¹O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,

E-mail: menshov.o@ukr.net;

¹K. Bondar, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher;

²O. Kruglov, PhD (Geol.), Senior Researcher;

¹R. Khomenko, PhD (Geol.), Assist.;

¹S. Popov, PhD (Geol.),

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

²NSC "Institute for Soil Science and Argochemistry Research n. a. O.N. Sokolovskiy",

4 Chaikovska Str., Kharkiv, Ukraine

GEOPHYSICS OF PEDOSPHERE IN KYIV UNIVERSITY

The development of studies of geophysics of pedosphere in Taras Shevchenko National University of Kyiv over the past thirty years is considered. The pedosphere is a unique and extremely informative object for the geophysical research. The physical and chemical properties of the objects within the pedosphere are related to the mineral deposits, soil science processes, anthropogenic influence during agricultural production, environmental pollution, paleogeographic processes, the history of human development as an archaeological heritage. In Ukraine, the study of soil magnetism began in the 90s of the 20th century in Kyiv University on the basis of the Student Design and Research Bureau. At the present moment, the investigation of all the initiated processes continues. The understanding of the physical foundations of the method is essential. The magnetic mineralogy of soils is investigated depending on the conditions of formation or introduction: pedogenesis, technogenesis, influence of hydrocarbons, etc. The new data at the same time verify the already existing theory, as well as deepen the not yet known aspects of the study of the pedosphere, raise new challenges to researchers. Analyzes are carried out both at the macro level within agricultural fields, urban agglomerations, oil and gas-bearing regions, and at the micro level for the smallest soil aggregates (pedon), magnetic minerals, magnetoactive domains, etc. The results of magnetic, magnetometric, electrometric and ground-penetrating radar studies in various spheres of the national economy are given.

Keywords: soil, pedosphere, geophysics, magnetic susceptibility, magnetic survey, electrical methods.

УДК 550.834.05:551.24

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.06>

С. Стовба, д-р геол. наук, голов. наук. співроб., проф.,
E-mail: stovbas@gmail.com,
Інститут геофізики імені С.І. Субботіна НАН України,
просп. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03142, Україна;
Інститут геологічних наук Польської академії наук, м. Краків, Польща;
П. Фенота, нач. від.,
E-mail: ppreview6@gmail.com,
АТ "Укргазвидобування", вул. Кудрявська, 26/28, м. Київ, 04053, Україна;
А. Тищенко, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: aptyshchenko@gmail.com,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
АТ "Укргазвидобування", вул. Кудрявська, 26/28, м. Київ, 04053, Україна;
Д. Венгрович, канд. фіз.-мат. наук,
E-mail: vengrovich@gmail.com,
Інститут геофізики імені С.І. Субботіна НАН України,
просп. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03142, Україна;
О. Хрящевська, канд. геол.-мінералог. наук, заст. голов. геолога,
E-mail: chevska2016@gmail.com,
ТОВ СПК-ГЕО, Київ, Україна

КРЕЙДОВИЙ РИФТОГЕНЕЗ У ГЕОЛОГІЧНІЙ ІСТОРІЇ УКРАЇНСЬКОГО СЕКТОРУ ЧОРНОГО МОРЯ

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

У межах українського сектору Чорного моря альб-сеноманські рифтові розломи утворили три великих за розмірами рифтових басейнів, кожний з яких складається із системи грабенів та напівграбенів. Один із субширотних рифтових басейнів займає сучасні Каркінітський прогин, Крилівсько-Зміїну зону підняття, вал Губкіна та Сулинську депресію на Одеському шельфі. Другий субширотний басейн займає сучасні підняття Тетяєва, прогин Сорочина, підводне продовження кримських складок та, вочевидь, Кримські гори. Третій рифтовий басейн простягався з північного заходу на південний схід та охоплював Евксинський грабен, вал Андрусова, Східночорноморський басейн та вал Шатського. Найбільша глибина залягання підосви рифтового комплексу спостерігається в центральній частині Західночорноморського басейну, де вона становить 15,5–16,5 км. У Східночорноморському басейні максимальна глибина її залягання становить 12,5–13,5 км. Найменші глибини залягання підосви рифтового комплексу характерні для Каламітського валу та підводного продовження Гірського Криму. Під час кайнозойських фаз стиснення практично всі рифтові (напів)грабени зазнали інтенсивних складчастих деформацій та вертикальних рухів від декількох сотень метрів до 4–5 км. Більшість рифтових розломів при цьому зазнали часткової або повної інверсії.

Ключові слова: Чорне море, Одеський шельф, Західночорноморський басейн, Східночорноморський басейн, вал Андрусова, рифтогенез, рифтові структури.

Вступ. Одним із ключових сегментів Паратетису є Чорне море, яке сформувалося на південній окраїні Євразії (рис. 1). Більшість сучасних геодинамічних моделей засновано на уявленні, що цей глибоководний морський басейн утворився в результаті активного рифтогенезу в задугувій тектонічній обстановці (Letouzey et al., 1977; Zonenshain, Le Pichon, 1986; Görür, 1988; Okay et al., 1994; Robinson et al., 1996; Spadini et al., 1996; Starostenko et al., 2004; Schellart, 2010; Munteanu et al., 2011; Nikishin et al., 2012; Graham et al., 2013; Stephenson et al., 2015; Okay et al., 2015; Nikishin et al., 2015a, 2015b; Munteanu et al., 2018; Monteleone et al., 2019). Вважається, що основна стадія цього рифтогенезу відбулася в крейді (наприклад, Okay et al., 1994; Nikishin et al., 2015a, 2015b; Stovba et al., 2020), хоча в багатьох моделях обґрунтовується прояв рифтогенезу і в палеогені (наприклад, Munteanu et al., 2011, 2018; Monteleone et al., 2019). Не виключено також, що рифтові процеси проявились на місці Чорного моря в кінці палеозою та в триасі-юрі (Zonenshain, Le Pichon, 1986; Stovba et al., 2020; Stephenson, Stovba, 2022).

Задугувий рифтогенез зазвичай розглядається як основний етап зародження та формування чорноморського басейну, який привів до суттєвого стоншення земної кори та супутнього опускання її поверхні перед структурними змінами в будові басейну під час кайнозойської

інверсії. Опубліковані геодинамічні моделі загалом підтверджуються геофізичними дослідженнями та узгоджуються з даними стосовно геодинамічних процесів, що відбувались на південній окраїні Євразії у пізньому палеозої та мезозої. Проте в наукових колах триває активна дискусія щодо особливостей та часу прояву рифтових процесів у різних частинах Чорного моря.

Ця робота присвячена розгляду нових даних стосовно впливу крейдових рифтових процесів на тектонічну будову українського сектору Чорного моря, який займає приблизно четверту частину від всієї площі моря (рис. 1). У процесі виконання досліджень проведено сейсмостратиграфічну інтерпретацію сейсмічних профілів загальною довжиною понад 30 000 км (Stovba et al., 2020) з використанням даних буріння більше 40 свердловин, пробурених у межах Одеського та Прикерченського шельфів (рис. 2), інформації стосовно результатів вивчення зразків гірських порід, драгованих з морського дна вздовж континентального схилу (рис. 2) та існуючих відомостей стосовно геологічної будови Кримського півострову (Геология СССР, 1969; Тектоника Украины, 1988; Попадюк та ін., 2013, 2015a), північно-західного (Одеського) та Прикерченського шельфів (Letouzey et al., 1977; Геология шельфа УССР, 1984, 1985, 1986, 1987; Тектоника Украины, 1988; Khriachtchevskaia et al., 2009a; Stovba et al., 2009).

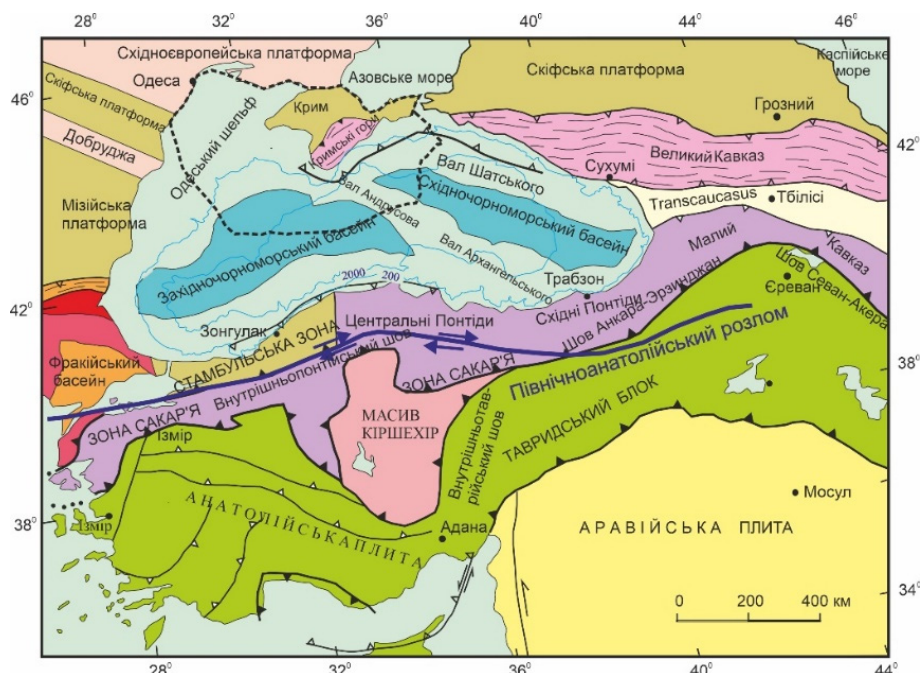


Рис. 1. Тектонічна карта Чорного моря та прилеглих регіонів (за Okay, Tüysüz, 1999; Stephenson, Schellart, 2010).
Умовні позначення: чорна пунктирна лінія обмежує район досліджень

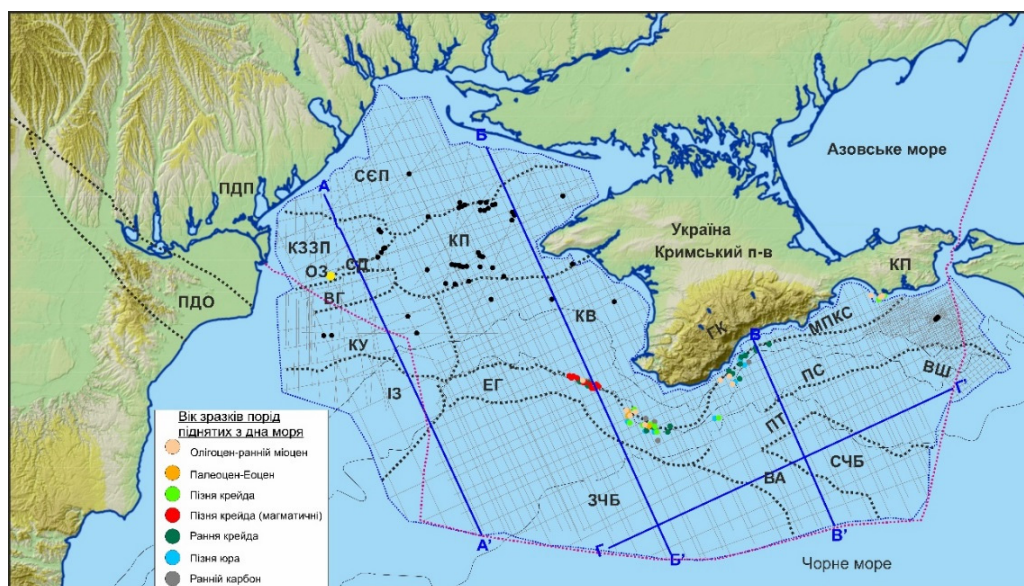


Рис. 2. Фізико-географічна карта ділянки досліджень.

Умовні позначення: границя українського сектору Чорного та Азовського морів (червона переривчаста лінія), контури регіональних тектонічних елементів (чорні переривчасті лінії), місцезнаходження ключових морських свердловин (чорні крапки), розташування сейсмічних профілів, місцезнаходження та вік зразків гірських порід піднятих з дна Чорного моря зі змінами віку деяких зразків, обґрунтованими в роботах (Stovba et al., 2017a, 2020). Границя сейсмічних досліджень показана синьою переривчастою лінією. Сейсмічні профілі Western Geophysical, НАК "Нафтогаз України", ДГП "Одесаморгео", які були задіяні в інтерпретації, показані сірими лініями. Проінтерпретовані сейсмічні профілі на рис. 4-7 показані жирними синіми лініями.

Скорочення назв тектонічних елементів: ВА – вал Андрусова; ВГ – вал Губкіна; ВШ – вал Шатського; ГК – Гірський Крим (Кримські гори); ЕГ – Евксинський грабен; ЗЧБ – Західночорноморський басейн; ІЗ – Істрійська западина; КЗЗП – Крилівсько-Зміїна зона підняття; КВ – Каламітський вал; КП – Каркінітський прогин; КУ – Крайовий уступ; МПКС – морське продовження кримських складок; ОЗ – острів Зміїний (показаний жовтим кольором); СЄП – Східноєвропейська платформа; СП – Сулінський прогин; ПС – прогин Сорокіна; ПДП – Переддобруджинський прогин; ПТ – підняття Тетяєва; СЧБ – Східночорноморський басейн. Свердловина Морська-1 знаходиться на острові Зміїний

Загальні характеристики будови та особливостей формування альб-сеноманського рифтового комплексу. На карті ізохрон підшови альб-сеноманського рифтового комплексу (рис. 3а) знаходять відображення всі відомі на сьогодні структурно-тектонічні елементи, які формувались починаючи з кінця ранньої

крейди під впливом тектонічних процесів, зумовлених рифтогенезом, пострифтовим (термічним) зануренням та кайнозойськими фазами складчастості.

На північно-західному шельфі відбиття від підшови альб-сеноманського комплексу розпізнаються досить впевнено, за винятком тих ділянок, де ці відклади не

формувались або були розмиті під час пізніших висхідних рухів. На деяких ділянках глибоководної частини моря, особливо в Західночорноморській западині та прогині Сорокіна, кореляцію відбиттів від підшови синрифтового комплексу можна виконати лише умовно. Тому структурні побудови хоча і добре відображають основні

особливості рельєфу підшови рифтового комплексу (рис. 3а), але похибки у визначенні глибини залягання цієї поверхні та товщин рифтового комплексу за відсутності достовірних швидкісних моделей середовища можуть досягати 1–1,5 км.

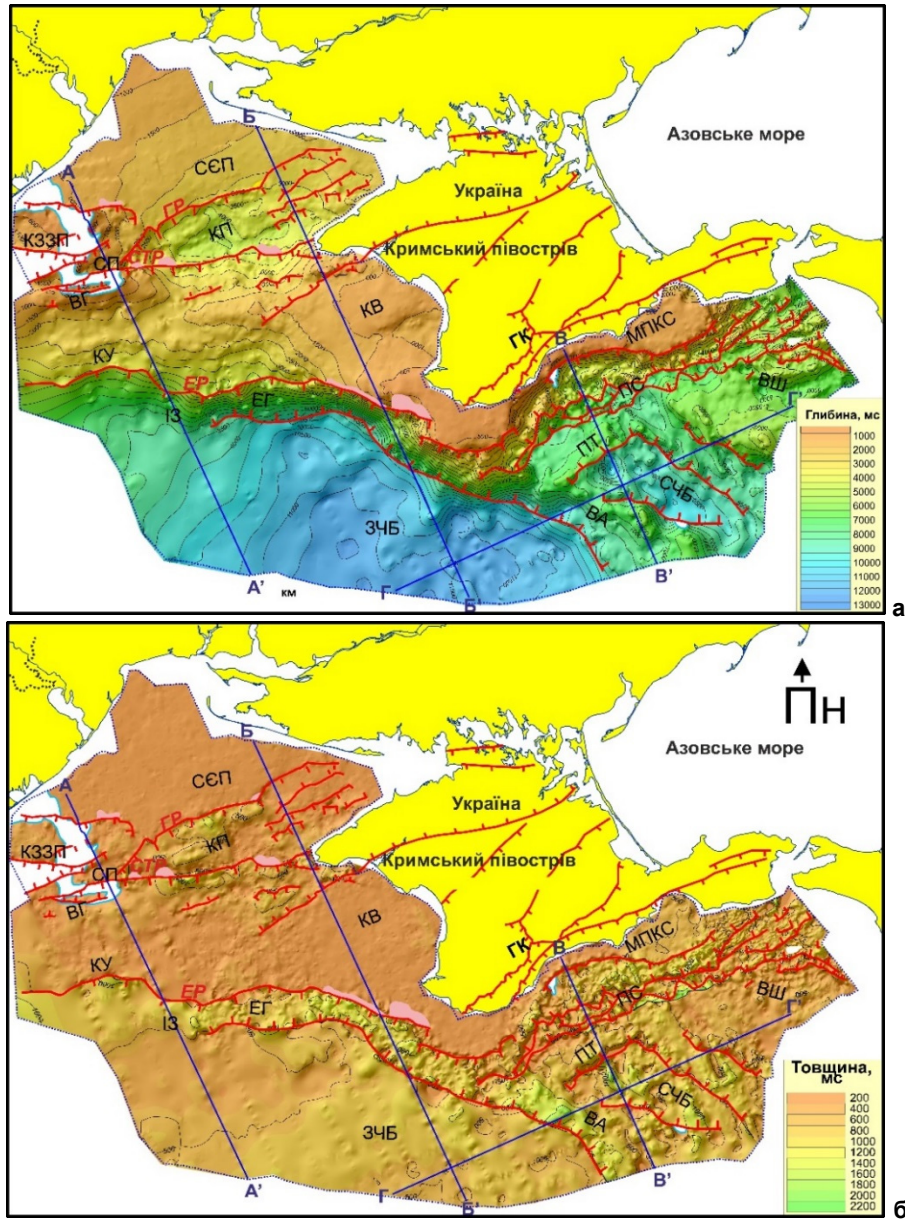


Рис. 3. Карта ізохрон (ліній рівних значень подвійного часу пробігу сейсмічних хвиль до цільової поверхні) підшови синрифтових відкладів крейди (а) та карта ізохор (товщин у часовому вимірі) синрифтових відкладів крейди (б) на території досліджень

Умовні позначення: рожевим кольором позначено ділянки, де осадконапичення рифтових відкладів не відбувалось.

На окремих ділянках рифтові відклади формувались, але були розмиті під час кайнозойських фаз стиснення.

Профілі, що демонструються на рис. 4–7, показані синіми жирними лініями. Крейдові розломи, що сформували систему рифтових грабенів та напівграбенів, показані червоними лініями. Розташування рифтових розломів у межах Кримського півострова запозичені з робіт (Stovba et al., 2017a, 2017b). Скорочені назви розломів: ГР – Голіцинський, СР – Сулінсько-Тарханкутський, ЕР – Евксинський. Інші позначення та скорочення – див. рис. 2

Найбільша глибина залягання підшови рифтового комплексу спостерігається в центральній частині Західночорноморського басейну (ЗЧБ), де вона становить 15,5–16,5 км (12,0 с). У Східночорноморському басейні (СЧБ) максимальна глибина її залягання становить 12,5–13,5 км (~10,0 с). Найменші глибини залягання

підшови рифтового комплексу характерні для Каламітського валу та підводного продовження Гірського Криму. На багатьох ділянках континентального схилу породи рифтового комплексу виходять на поверхню морського дна (рис. 5, 6). Окрім сейсмічних матеріалів про це свідчать дані відбору зразків порід з дна моря (рис. 2).

Рифтові структури північно-західного (Одеського) шельфу. Каркінітський прогин та Каламітський вал. Значну частину північно-західного шельфу займає Каркінітський прогин (рис. 2–5). Утворення цього прогину зумовлене формуванням субширотної системи протяжних грабенів та напівграбенів під час розтягу земної кори. (Напів)грабени були відділені один від одного скидами переважно південного падіння з амплітудою до 2 км і більше (рис. 3). Сучасна глибина залягання піддоши синрифтових покладів у прогині досягає 8–9 км, а максимальна товщина синрифтових порід, які заповнюють (напів)грабени, становить 1–2 км.

Під час розломоутворення підняті частини деяких напівграбенів залишалися над рівнем моря і зазнавали ерозії протягом усього часу рифтогенезу, як це зафіксовано, наприклад, поблизу Голіцинського та Сулінсько-Тарханкутського розломів (рис. 3, 4в). Осадконакопичення на піднятих крилах більшості із цих напівграбенів почалось тільки після їх занурення нижче рівня моря під час пізньокрейдової пострифтової фази занурення Каркінітського прогину. Ділянки напівграбенів, які формувались поблизу опущених (висячих) крил рифтових скидів, заповнювались відкладами, які в напрямку піднятих частин напівграбенів поступово зменшувались у потужності аж до повного їх виклинювання. Такий характер осадконакопичення призвів до того, що в межах досліджуваної території рифтовий комплекс поширений не повсюдно. Навіть у найзануреніших частинах Каркінітського прогину є ділянки, де рифтовий комплекс або повністю відсутній, або має незначну товщину (рис. 3).

Каркінітський рифт відділений від свого північного борту (південного схилу СЄП) Голіцинським розломом, який має південне падіння та амплітуду до 1–2 км (рис. 3–5). Зчленування Каркінітського крейдового рифту з Каламітським валом, який у першому наближенні можна розглядати як південний борт цього палеорифту, проходить по системі скидів північного падіння (рис. 3а). У східній частині валу рифтовий комплекс має відносно невелику потужність та просту будову, що характерно для бортових частин більшості рифтових басейнів (рис. 9). Каламітський вал та зона шельфу на північ від Голіцинського розлому майже не порушені пострифтовими деформаціями осадового чохла. Подібні особливості є типовими для бортів більшості рифтових басейнів.

У деяких роботах як окремий тектонічний елемент північно-західного шельфу виділяється грабен Штормовий (Robinson, Kerusov, 1997; Dinu et al., 2005), обмежений з півночі Сулінсько-Тарханкутським розломом південного падіння з амплітудою від 1 до 2 км. Однак інтерпретація сейсмічних даних та проведені тектонічні палеорекострукції показали, що цей (напів)грабен сформувався вздовж Сулінсько-Тарханкутського розлому і розташований в осьовій частині Каркінітського палеорифту (рис. 3). Тому грабен Штормовий не може розглядатись як окремий тектонічний елемент Одеського шельфу.

Деякі кайнозойських фаз регіонального стиснення спричинили інверсійні рухи вздовж площин рифтових скидів. Найінтенсивніші деформації синрифтових та пострифтових товщ, які супроводжувались формуванням антиклінальних складок на північно-західному шельфі, відбулись уздовж крайових розломів рифту та Сулінсько-Тарханкутського розлому (рис. 3а, 5). Більш детально механізм формування цих локальних структур вже розглядався в роботах (Robinson, Kerusov, 1997; Khriachtchevskaia et al., 2010).

Вал Губкіна, Сулінський прогин та Кілійсько-Зміїна зона підняття. Ці тектонічні елементи розташовані на захід від Каркінітського прогину (рис. 2, 3). Сейсмічні зображення крейдового рифтового комплексу (рис. 4а) та палеотектонічні реконструкції на кінець рифтової стадії (рис. 4в) вказують на те, що в альб-сеноманський час на місці сучасних підняттях були сформовані грабени та напівграбени (рис. 4в, 3). Ці структури розтягу входили складовою частиною в єдиний Каркінітсько-Губкінський рифтовий басейн (рис. 3). Під час кайнозойських фаз регіонального стиснення напівграбени були інвертовані, а на їх місці утворилась складчаста система валу Губкіна та Кілійсько-Зміїної зони підняття (Khriachtchevskaia et al., 2010). Амплітуда вертикального зміщення осадової товщі вздовж площин первинно нормальних рифтових скидів на окремих ділянках перевищувала 3 км. Значна частина рифтових та пострифтових порід у склепіннях сформованих складок довгий час перебувала вище рівня моря і була розмита. На деяких ділянках рифтовий осадовий чохол був повністю еродований, і дорифтові мезозой-палеозойські товщі залягають безпосередньо під тонким шаром міоцен-пліоценових відкладів (рис. 4). Цей факт підтверджується даними буріння свердловини Морська-1, яка на острові Зміїний розкрила породи силуру та девону (Геологія шельфа УРСР, 1986). Ці породи в морській акваторії поблизу берегової лінії острова перекриті тонким шаром неогенових відкладів.

Крайовий уступ. Під час рифтогенезу Крайовий уступ був піднятим крилом протяжного напівграбена, який формувався вздовж Сулінсько-Тарханкутського розлому на місці сучасного валу Губкіна (рис. 3, 4в). Про це свідчать закономірне збільшення товщини синрифтових відкладів з Крайового уступу в напрямку склепінної частини валу Губкіна, а також типовий для напівграбенів характер напластування альб-сеноманських відкладів (рис. 4). Отже, Крайовий уступ до початку кайнозойських інверсійних рухів являв собою західне продовження Каламітського валу і разом з ним формував південний борт єдиного Каркінітсько-Губкінського рифтового басейну.

Рифтові структури глибоководної частини моря. У межах сучасного континентального схилу, на півночі глибоководної частини Чорного моря та у всій східній частині площі досліджень під час альб-сеноманського рифтогенезу сформувались витягнуті у субширотному та південно-східному напрямках системи грабенів та напівграбенів, відокремлених один від одного розломами з амплітудою від декілька сотень метрів до 2–3 км і більше (рис. 3). Товщина синрифтових відкладів у (напів)грабенах становить від 1 до 3 км, що порівнянно з потужностями синрифтового комплексу у Каркінітсько-Губкінському рифтовому басейні (рис. 3б, 4–7).

Евксинський грабен. Цей рифтовий грабен розташований на півночі сучасної Західночорноморської западини (рис. 3б, 5). Його ширина змінюється від 15 до 35 км. Грабен відокремлюється від Каламітського валу та Крайового уступу однойменним розломом південного падіння. Ці тектонічні елементи можуть разом розглядатись як північний борт Евксинського палеорифтового басейну. Вертикальна амплітуда Евксинського розлому на час рифтової фази досягала 2 км і більше. Розлом простежується до берегової лінії крайньої західної частини Кримського півострова (рис. 5, 9б, 10). Далі на схід у межах суходолу він, імовірно, є складовою системи крейдових рифтових розломів, які формувалися на місці

сучасного Гірського Криму (рис. 3) (Stovba et al., 2013, 2017a, 2017b). Скид північного падіння, який в альбі-сеномані відділяв Евксинський грабен від основної частини сучасної Західночорноморської западини, у східній частині мав амплітуду від перших сотень метрів до 1,5–2 км (рис. 3, 5). У західному напрямку його амплітуда поступово зменшувалась до повного затухання (рис. 3, 4). На південь від південно-західного краю Кримського півострова це тектонічне порушення розгалужується на декілька розломів, які у східній частині моря входять до складу двох основних систем рифтових структур субширотного та південно-східного простягання (рис. 3).

Прогин Сорокіна, вал Тетяєва та морське продовження Кримських складок. Протяжні субширотні (напів)грабени, які в альбі-сеноманський час формувались унаслідок розтягу земної кори на місці прогину Сорокіна, валу Тетяєва та морського продовження Кримських складок, відокремлювались один від одного високоамплітудними скидами північного падіння (рис. 6в). У той же час морське продовження Кримських складок відокремлювалось від сучасного Гірського Криму скидом південного падіння (рис. 6в). Згідно з останніми даними польових досліджень на території Гірського Криму під час крейдового рифтогенезу також формувались в основному субширотно орієнтовані (напів)грабени, які були складовими елементами північної частини більш широкого рифтового басейну. Головні рифтові розломи в межах Гірського Криму мають переважно південне падіння (рис. 3). Ширина крейдового рифтового басейну із врахуванням його суходільної та морської частин Гірського Криму, прогину Сорокіна та валу Тетяєва сягає від 60 до 120 км, а ширина частини субширотного рифтового басейну, яка нині прихована водами Чорного моря, варіює від 50 до 80 км (рис. 3).

Східночорноморська западина, вали Андрусова та Шатського. Під час ранньокрейдowego рифтогенезу в області сучасних валу Андрусова, Східночорноморської западини та валу Шатського сформувались дві протяжні грабеноподібні структури, які відділялися одна від одної коровими розломами південно-східного простягання та вертикальною амплітудою 1–2 км і більше (рис. 3б, 7). В області валу Андрусова формувався грабен, а в області валу Шатського напівграбен з опущеним західним крилом (рис. 3б, 7). У крайній східній частині підняте крило валу Шатського відокремлюється від прикавказької частини Чорного моря (Туапсинського прогину) коровим розломом північно-східного падіння (рис. 3б).

Найінтенсивніші низхідні рухи в області валу Андрусова відбулись уздовж розлому, який на рівні крейдових рифтових відкладів відділяє цей вал від Західночорноморської западини (рис. 3б, 7). Східна частина Західночорноморської западини, яка межує із сучасним валом Андрусова, в альбі-сеноманський час являла собою підняте крило цього розлому (рис. 3б, 7в).

У тій частині Західночорноморської западини, яка покрита сейсмічною зйомкою, крупноамплітудних рифтових розломів не зафіксовано (рис. 3а). Винятком є описані вище розломи, які привели до формування Евксинського грабена на півночі та грабена на місці сучасного валу Андрусова на сході. Горбистий характер підшови синрифтового комплексу та деякі характеристики хвильового поля дозволяють припустити прояв розривної тектоніки у Західночорноморській западині під час альбі-сеноманського розтягу земної кори. Не виключено, що частина западини, яка розташована в

українському секторі моря, на рифтовому етапі була піднятим крилом значних за розміром напівграбенів, опущені крила яких знаходяться в румунських, болгарських та турецьких водах Чорного моря.

Під час кайнозойських фаз стиснення практично всі рифтові (напів)грабени зазнали інтенсивних складчастих деформацій та вертикальних рухів від декількох сотень метрів до 4–5 км завдяки витисканню блоків земної кори між коровими скидами, які обмежували ці рифтові структури (рис. 4–7). Більшість рифтових розломів зазнали при цьому часткової або повної інверсії. Деякі з них навіть на рівні рифтових відкладів перетворились у підкиди та насуви. Тому на структурній карті системи грабенів, які зазнали інверсії, мають вигляд складчастих систем субширотного та південно-східного простягання (рис. 3а). Альбі-сеноманський рифтовий комплекс на тривалий час виводився на денну поверхню в межах західної частини Каркінітсько-Губкінського рифту, північної частини Евксинського грабена, Гірського Криму та його морського продовження, валів Андрусова, Тетяєва, Шатського та навіть Східночорноморської западини. Внаслідок цього альбі-сеноманські відклади цих геологічних споруд були частково, а на значній площі Кілійсько-Зміїної зони підняті та Гірського Криму навіть повністю розмиті (рис. 3–7). Тому сучасна товщина синрифтового комплексу (рис. 3б) на багатьох ділянках є меншою, ніж у кінці рифтогенезу.

Більшість сучасних тектоно-геодинамічних моделей засновані на уявленні про те, що вали Андрусова і Шатського є стабільними і протяжними піднятими блоками, які утворилися ще під час рифтогенезу (наприклад, Görür, 1988; Nikishin et al., 2015a, 2015b; Tari et al., 2015). Водночас вал Андрусова розвивався як континентальна країна Західночорноморського та Східночорноморського (суб)океанічних басейнів і здійснювався в північній глибоководній зоні між цими басейнами до кінця олігоцену–раннього міоцену, а потім вже не впливав на осадконакопичення в цих двох басейнах, які повністю перетворилися в єдиний глибоководний басейн. Вал Шатського також розглядається як рифтова країна Східночорноморського (суб)океанічного басейну, який розкрився в результаті спредінгу океанічної кори між цим валом і валом Андрусова. Однак наші результати свідчать про те, що вали Андрусова та Шатського являли собою занурені частини великого за розміром крейдового рифтового басейну. Тільки в кінці еоцену вони були інвертовані під дією регіонального стиснення і перетворились у крупні позитивні структури.

Висновки.

1. У межах українського сектору Чорного моря альбі-сеноманські рифтові розломи утворили три великих за розмірами рифтових басейнів, кожний з яких складався із системи грабенів та напівграбенів.

2. Один із субширотних рифтових басейнів займав сучасні Каркінітський прогин, Крилівсько–Зміїну зону підняття, вал Губкіна та Сулинську депресію на Одеському шельфі. Другий субширотний басейн займав сучасні підняття Тетяєва, прогин Сорокіна, підводне продовження кримських складок та, вочевидь, Кримські гори. Третій рифтовий басейн простягався з північного заходу на південний схід та охоплював Евксинський грабен, вал Андрусова, Східночорноморський басейн та вал Шатського.

3. Найбільша глибина залягання підшови рифтового комплексу спостерігається в центральній частині

Західночорноморського басейну, де вона становить 15,5–16,5 км (12,0 с). У Східночорноморському басейні максимальна глибина її залягання становить 12,5–13,5 км (~10,0 с). Найменші глибини залягання підосви рифтового комплексу характерні для Каламітського валу та підводного продовження Гірського Криму.

4. Під час кайнозойських фаз стиснення практично всі рифтові (напів)грабени зазнали інтенсивних складчастих деформацій та вертикальних рухів від декількох сотень метрів до 4–5 км. Водночас більшість рифтових розломів зазнали часткової або повної інверсії.

Список використаних джерел

- Геология СССР. (1969). Т. VIII. Крым. Часть 1. Геологическое описание и карта. М.: Недра, 576 с.
- Геология шельфа УССР (шельф и побережье Черного моря). (1984). Стратиграфия. Ред. Т.В. Астахова, С.В. Горбач, Е.Ю. Краева. Киев: Наук. думка, 184 с.
- Геология шельфа УССР. (1985). Литология. Ред. Е.Ф. Шнюков. Киев: Наук. думка, 189 с.
- Геология шельфа УССР. (1986). Нефтегазоносность. Ред. Л.Т. Богаец, Г.К. Бондарчук, И.В. Лесков. Киев: Наук. думка, 152 с.
- Геология шельфа УССР. (1987). Тектоника. Ред. Е.Ф. Шнюков. Киев: Наук. думка, 152 с.
- Иванников, А.В., Иноземцев, Ю.И., Ступина, Л.В. (1999). Стратиграфия мезозойских и кайнозойских отложений континентального склона Черного моря. В кн.: Геология и полезные ископаемые Черного моря. Киев: Наук. думка, с. 253–262.
- Иванников, А.В., Ступина, Л.В. (2003). Стратиграфия глубоководных отложений континентального склона Крыма по результатам 57-го рейса НИС "Профессор Водяницкий". *Геологический журнал*, 1, 40–41.
- Попадюк, І.В., Стовба, С.М., Хрящевська, О.І. (2013). Нова геологічна карта Гірського Криму масштабу 1:200000 та її статиграфічне підґрунтя. *Матеріали міжнародної наукової конференції "Стратиграфія осадових відкладів верхнього протерозою і фанерозою"*. Київ: Інститут геологічних наук НАН України, 117–118.
- Попадюк, І.В., Стовба, С.М., Хрящевська, О.І. (2015а). Нова геологічна карта кримських гір масштабу 1:200000. *Матеріали міжнародної наукової конференції "Фундаментальне значення і прикладна роль геологічної освіти і науки"*. Львів: Львівський нац. ун-т ім. І.Франка, 175–178.
- Тектоника Украины. (1988). Ред. С.С. Круглов, А.К. Ципко. Москва: Недра, 254 с.
- Dinu, C., Wong, H.K., Tambrea, D., Matenco, L. (2005). Stratigraphic and structural characteristics of the Romanian Black Sea shelf. *Tectonophysics*, 410, 417–435.
- Finetti, I., Bricchi, G., Del Ben, A., Pipan, M., Xuan Z. (1988). Geophysical study of the Black Sea area. *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, 30 (117–118), 197–324.
- Görür, N. (1988). Timing of opening of the Black Sea basin. *Tectonophysics*, 147, 247–262.
- Graham, R., Kaymakci, N., Horn, B.W. (2013). The Black Sea: something different? *GEO EXPRO*, 10, 58–62.
- Hippolyte, J.C., Murovskaya, A., Volfman, Yu., Yegorova, T., Gintov, O. (2018). Age and geodynamic evolution of the Black Sea Basin: Tectonic evidences of rifting in Crimea. *Marine and Petroleum Geology*, 93, 298–314.
- Khriachtchevskaia, O.I., Stovba, S.M., Popadyuk, I.V. (2009a). Hydrocarbon prospects in the Western Black Sea of Ukraine. *Leading Edge*, 29, 9, 1024–1029. <https://doi.org/10.1190/1.3236371>.
- Khriachtchevskaia, O.I., Stovba, S.M., Stephenson, R.A. (2010). Cretaceous-Neogene tectonic evolution of the northern margin of the Black Sea from seismic reflection data and tectonic subsidence analysis. In: R.A. Stephenson (Ed.) *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Special Publications, 340. London: Geological Society, 137–157. <http://dx.doi.org/10.1144/SP340.8>.
- Letouzey, J., Bijou-Duval, B., Dorkel, A., Gonnard, R., Krischev, K., Montadert, L., Sungurlu, O. (1977). The Black Sea: a marginal basin: geophysical and geological data. In: B. Bijou-Duval, L. Montadert (Eds.) *Structural History of the Mediterranean Basins*. Editions Technip, Paris, 363–376.
- Monteleone, V., Minshall, T.A., Marin-Moreno, H. (2019). Spatial and temporal evolution of rifting and continental breakup in the Eastern Black Sea Basin revealed by long-offset seismic reflection data. *Tectonics*, 38.
- Munteanu, I., Diviacco, P., Sauli, C., Dinu, C., Burca, M., Panin, N., Brancatelli, G. (2018). New Insights into the Black Sea Basin, in the Light of the Reprocessing of Vintage Regional Seismic Data. In: C.W. Finkl, C. Makowski (Eds.) *Diversity in Coastal Marine Sciences*, 91–114. DOI: 10.1007/978-3-319-57577-3_6
- Munteanu, I., Matenco, L., Dinu, C., Cloetingh, S. (2011). Kinematics of back-arc inversion of the Western Black Sea Basin. *Tectonics*, 30 (5), 1–21. <http://dx.doi.org/10.1029/2011TC002865>
- Nikishin, A.M., Korotaev, M.V., Ershov, A.V., Brunet, M.-F. (2003). The Black Sea basin: tectonic history and Neogene-Quaternary rapid subsidence modelling. *Sedimentary Geology*, 156, 149–168.
- Nikishin, A.M., Okay, A.I., Tüysüz, O., Demirel, A., Amelin, N., Petrov, E. (2015a). The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. Part 1: Basins structure and fill. *Marine and Petroleum Geology*, 59, 638–655.
- Nikishin, A.M., Okay, A.I., Tüysüz, O., Wannier, M., Demirel, A., Amelin, N., Petrov, E. (2015b). The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. Part 2: Tectonic history and paleogeography. *Marine and Petroleum Geology*, 59, 656–670.
- Nikishin, A.M., Wannier, M., Alekseev, A.S., Almendiger, O.A., Fokin, P.A., Gabdullin, R.R., Khudoley, A.K., Kopayevich, L.F., Mityukov, A.V., Petrov, E.I., Rubtsova, E.V. (2017). Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. In: M. Sosson, R.A. Stephenson, S.A. Adamia (Eds.) *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geological Society, London Special Publications, 428, 241–264. <http://doi.org/10.1144/SP428.1>
- Nikishin, A.M., Ziegler, P.A., Bolotov, S.N., Fokin, P.A. (2012). Late Palaeozoic to Cenozoic evolution of the Black Sea – Southern Eastern Europe region: a view from the Russian platform. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 20, 571–634. <http://doi.org/10.3906/yer-1005-22>.
- Okay, A.I., Nikishin, A.M. (2015). Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. *International Geology Review*, 57 (5–8), 1–26. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2015.1010609>.
- Okay, A.I., Sengör, A.M.C., Görür, N. (1994). Kinematic history of the opening of the Black Sea: its effects on the surrounding regions. *Geology*, 22, 267–270.
- Okay, A.I., Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. In: The Mediterranean Basins, Tertiary Extension within the Alpine Orogen. Geological Society, London Special Publications, 156, 475–515.
- Popadyuk, I.V., Stovba, S.M., Khriachtchevskaia, O.I. (2013a). The new geological map of the Crimea mountains by SPK – Geoservice as a new approach to understanding the Black Sea region. *Abstracts of Darius Programme, Eastern Black Sea – Caucasus Workshop, 24–25 June, Tbilisi, Georgia*, 48–50.
- Robinson, A.G., Kerasov, E. (1997). Stratigraphic and structural development of the Gulf of Odessa, Ukrainian Black Sea, implications for petroleum exploration. In: A.G. Robinson (Ed.) *Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region*. OK, Tulsa: Amer. Assoc. Petr. Geol., Memoir, 68, 369–380.
- Robinson, A.G., Rudat, J.H., Banks, C.J., Wiles, R.L.F. (1996). Petroleum Geology of the Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 13, 195–223.
- Sheremet, Y., Sosson, M., Muller, C., Gintov, O., Murovskaya, A., Yegorova, T. (2016a). Key problems of stratigraphy in the Eastern Crimea Peninsula: some insights from new dating and structural data. In: M. Sosson, R.A. Stephenson, S.A. Adamia (Eds.) *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geological Society, London Special Publications, 428–1, 265–305. <http://doi.org/10.1144/SP428.14>
- Spadini, G., Robinson, A., Cloetingh, S. (1996). Western versus Eastern Black Sea tectonic evolution: pre-rift lithosphere controls on basin formation. *Tectonophysics*, 266, 139–154.
- Starostenko, V., Buryanov, V., Makarenko, I., Rusakov, O., Stephenson, R., Nikishin, A., Georgiev, G., Gerasimov, M., Dimitriu, R., Legostaeva, O., Pchelarov, V., Sava, C. (2004). Topography of the crust-mantle boundary beneath the Black Sea basin. *Tectonophysics*, 381, 211–233.
- Stephenson, R., Schellart, W.P. (2010). The Black Sea back-arc basin: insights to its origin from geodynamic models of modern analogues. In: M. Sosson, N. Kaymakci, R.A. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (Eds.) *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Geological Society London, Special Publication, 340, 11–21. <http://dx.doi.org/10.1144/SP340.2>.
- Stephenson, R., Stovba, S. (2022). Review of the main Black Sea rifting phase in the Cretaceous and implications for the evolution of the Black Sea lithosphere. *Journal of Geodynamics*, 149, 101891.
- Stovba, S.M., Khriachtchevskaia, O.I., Popadyuk, I.V. (2009). Hydrocarbon Bearing Area in the Eastern Part of the Ukrainian Black Sea. *The Leading Edge*, 29 (9), 1042–1045.
- Stovba, S.M., Khriachtchevskaia, O.I., Popadyuk, I.V. (2013). Crimea and Ukrainian Eastern Black Sea basin as an inverted Early Cretaceous rift system. *Abstracts of Darius Programme, Eastern Black Sea – Caucasus Workshop, 24–25 June, Tbilisi, Georgia*, 65–67.
- Stovba, S.M., Popadyuk, I.V., Fenota, P.O., Khriachtchevskaia, O.I. (2020). Geological structure and tectonic evolution of the Ukrainian sector of the Black Sea. *Geophysical Journal*, 5, 42, 53–106. DOI:10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215072
- Stovba, S.M., Popadyuk, I.V., Khriachtchevskaia, O.I., Fenota, P.O. (2017a). The Ukrainian Sector of the Black Sea and Crimea: the Atlas of Subcrop Maps and Palaeogeographical Reconstructions. *Abstracts of EAGE conference Geoinformatics, Kyiv*, 20–24. DOI: 10.3997/2214-4609.201701799
- Stovba, S.M., Popadyuk, I.V., Khriachtchevskaia, O.I., Fenota, P.O. (2017b). Crimea and Ukrainian Black Sea: the origin, tectonics and evolution. *Abstracts of EAGE conference Geoinformatics, Kyiv*, 577–581. DOI:10.3997/2214-4609.201701798
- Tari, G., Fallah, M., Kosi, W., Schleider, Z., Turi, V., Krezsek, C. (2015). Regional Rift Structure of the Western Black Sea Basin: Map-View Kinematics. In: *Petroleum Systems in "Rift" Basins*, 372–395. DOI: 10.5724/gcs.15.34.0372

Zonenshain, L.P., Le Pichon, X. (1986). Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins. *Tectonophysics*, 123, 181–211.

References

- Dinu, C., Wong, H.K., Tambrea, D., Matenco, L. (2005). Stratigraphic and structural characteristics of the Romanian Black Sea shelf. *Tectonophysics*, 410, 417–435.
- Finetti, I., Bricchi, G., Del Ben, A., Pipan, M., Xuan Z. (1988). Geophysical study of the Black Sea area. *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, 30 (117–118), 197–324.
- Geology of shelf of UkrSSR (the shelf and the Black Sea coast). (1984). Stratigraphy. T.V. Astakhova, S.V. Gorbac, E.Yu. Kraeva (Eds.). Kiev: Naukova dumka, 184 p. [in Russian]
- Geology of shelf of UkrSSR. (1985). Lithology. V.I. Melnik (Ed.). Kiev: Naukova dumka, 189 p. [in Russian]
- Geology of shelf of UkrSSR. (1986). Oil-and-gas. A.T. Bogaets, G.K. Bondarchuk, I.V. Leskov (Eds.). Kiev: Naukova dumka, 152 p. [in Russian]
- Geology of shelf of UkrSSR. (1987). Tectonics. E.F. Shnyukov (Ed.). Kiev: Naukova dumka, 152 p. [in Russian]
- Geology of USSR. (1969) Vol. VIII. The Crimea. Part 1. Geological Description and a map. M.V. Muratov (Ed.). Moscow: Nedra, 576 p. [in Russian]
- Görür, N. (1988). Timing of opening of the Black Sea basin. *Tectonophysics*, 147, 247–262.
- Graham, R., Kaymakci, N., Horn, B.W. (2013). The Black Sea: something different? *GEO ExPRO*, 10, 58–62.
- Hippolyte, J.C., Murovskaya, A., Volfman, Yu., Yegorova, T., Gintov, O. (2018). Age and geodynamic evolution of the Black Sea Basin: Tectonic evidences of rifting in Crimea. *Marine and Petroleum Geology*, 93, 298–314.
- Ivannikov, A.V., Inozemtsev, Yu.I., Stupina, L.V. (1999). Stratigraphy of the Mesozoic and Cenozoic sediments of the continental slope of the Black Sea. In: *Geology and Minerals of the Black Sea*. Kiev: Naukova dumka, 253–262. [in Russian]
- Ivannikov, A.V., Stupina, L.V. (2003). Stratigraphy of deep-sea sediments of the continental slope of Crimea based on the results of the 57th cruise of the scientific research institute "Professor Vodyanitsky". *Geological journal*, 1, 40–41. [in Russian]
- Khriachtchevskaia, O.I., Stovba, S.M., Popadyuk, I.V. (2009a). Hydrocarbon prospects in the Western Black Sea of Ukraine. *Leading Edge*, 29, 9, 1024–1029. <http://doi.org/10.1190/1.3236371>.
- Khriachtchevskaia, O.I., Stovba, S.M., Stephenson, R.A. (2010). Cretaceous-Neogene tectonic evolution of the northern margin of the Black Sea from seismic reflection data and tectonic subsidence analysis. In: R.A. Stephenson (Ed.) *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Special Publications, 340. London: Geological Society, 137–157. <http://dx.doi.org/10.1144/SP340.8>.
- Letouzey, J., Biju-Duval, B., Dorkel, A., Gonnard, R., Krischev, K., Montadert, L., Sungurlu, O. (1977). The Black Sea: a marginal basin: geophysical and geological data. In: B. Biju-Duval, L. Montadert (Eds.) *Structural History of the Mediterranean Basins*. Editions Technip, Paris, 363–376.
- Monteleone, V., Minshall, T.A., Marin-Moreno, H. (2019). Spatial and temporal evolution of rifting and continental breakup in the Eastern Black Sea Basin revealed by long-offset seismic reflection data. *Tectonics*, 38.
- Munteanu, I., Diviacco, P., Sauli, C., Dinu, C., Burca, M., Panin, N., Brancatelli, G. (2018). New Insights into the Black Sea Basin, in the Light of the Reprocessing of Vintage Regional Seismic Data. In: C.W. Finkl, C. Makowski (Eds.) *Diversity in Coastal Marine Sciences*, 91–114. DOI 10.1007/978-3-319-57577-3_6
- Munteanu, I., Matenco, L., Dinu, C., Cloetingh, S. (2011). Kinematics of back-arc inversion of the Western Black Sea Basin. *Tectonics*, 30 (5), 1–21. <http://dx.doi.org/10.1029/2011TC002865>
- Nikishin, A.M., Korotaev, M.V., Ershov, A.V., Brunet, M.-F. (2003). The Black Sea basin: tectonic history and Neogene-Quaternary rapid subsidence modelling. *Sedimentary Geology*, 156, 149–168.
- Nikishin, A.M., Okay, A.I., Tüysüz, O., Demirel, A., Amelin, N., Petrov, E. (2015a). The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. Part 1: Basins structure and fill. *Marine and Petroleum Geology*, 59, 638–655.
- Nikishin, A.M., Okay, A.I., Tüysüz, O., Wannier, M., Demirel, A., Amelin, N., Petrov, E. (2015b). The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. Part 2: Tectonic history and paleogeography. *Marine and Petroleum Geology*, 59, 656–670.
- Nikishin, A.M., Wannier, M., Alekseev, A.S., Almendiger, O.A., Fokin, P.A., Gabdullin, R.R., Khudoley, A.K., Kopayev, L.F., Mityukov, A.V., Petrov, E.I., Rubtsova, E.V. (2017). Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. In: M. Sosson, R.A. Stephenson, S.A. Adamia (Eds.) *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geological Society, London Special Publications, 428, 241–264. <http://doi.org/10.1144/SP428.1>
- Nikishin, A.M., Ziegler, P.A., Bolotov, S.N., Fokin, P.A. (2012). Late Palaeozoic to Cenozoic evolution of the Black Sea – Southern Eastern Europe region: a view from the Russian platform. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 20, 571–634. <http://doi.org/10.3906/yer-1005-22>.
- Okay, A.I., Nikishin, A.M. (2015). Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. *International Geology Review*, 57 (5–8), 1–26. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2015.1010609>.
- Okay, A.I., Şengör, A.M.C., Görür, N. (1994). Kinematic history of the opening of the Black Sea: its effects on the surrounding regions. *Geology*, 22, 267–270.
- Okay, A.I., Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. In: The Mediterranean Basins, Tertiary Extension within the Alpine Orogen. Geological Society, London Special Publications, 156, 475–515.
- Popadyuk, I.V., Stovba, S.M., Khriachtchevskaia, O.I. (2013a). The new geological map of the Crimea mountains by SPK – Geoservice as a new approach to understanding the Black Sea region. *Abstracts of Darius Programme, Eastern Black Sea – Caucasus Workshop, 24–25 June, Tbilisi, Georgia*, 48–50.
- Popadyuk, I.V., Stovba, S.M., Khriachtchevskaia, O.I. (2013b). The new geological map of the Crimea Mountains, scale 1: 200000, and its stratigraphic background. *Materials of the international scientific conference "Stratigraphy of sedimentary formations of the Upper Proterozoic and Phanerozoic"*, Kyiv, 117–118. [in Ukrainian]
- Popadyuk, I.V., Stovba, S.M., Khriachtchevskaia, O.I. (2015a). The new geological map of the Crimean Mountains of scale 1: 200000. *Materials of the international conference "Fundamental significance and applied role of geological education and science"*. Lviv: Lviv National University by I. Franka, 175–178. [in Ukrainian]
- Robinson, A.G., Kersov, E. (1997). Stratigraphic and structural development of the Gulf of Odessa, Ukrainian Black Sea, implications for petroleum exploration. In: A.G. Robinson (Ed.) *Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region*. OK, Tulsa: Amer. Assoc. Petr. Geol., Memoir, 68, 369–380.
- Robinson, A.G., Rudat, J.H., Banks, C.J., Wiles, R.L.F. (1996). Petroleum Geology of the Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 13, 195–223.
- Sheremet, Y., Sosson, M., Muller, C., Gintov, O., Murovskaya, A., Yegorova, T. (2016a). Key problems of stratigraphy in the Eastern Crimea Peninsula: some insights from new dating and structural data. In: M. Sosson, R.A. Stephenson, S.A. Adamia (Eds.) *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geological Society, London Special Publications, 428–1, 265–305. <http://doi.org/10.1144/SP428.14>
- Spadini, G., Robinson, A., Cloetingh, S. (1996). Western versus Eastern Black Sea tectonic evolution: pre-rift lithosphere controls on basin formation. *Tectonophysics*, 266, 139–154.
- Starostenko, V., Buryanov, V., Makarenko, I., Rusakov, O., Stephenson, R., Nikishin, A., Georgiev, G., Gerasimov, M., Dimitriu, R., Legostaeva, O., Pchelarov, V., Sava, C. (2004). Topography of the crust-mantle boundary beneath the Black Sea basin. *Tectonophysics*, 381, 211–233.
- Stephenson, R., Schellart, W.P. (2010). The Black Sea back-arc basin: insights to its origin from geodynamic models of modern analogues. In: M. Sosson, N. Kaymakci, R.A. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (Eds.) *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Geological Society London, Special Publication, 340, 11–21. <http://dx.doi.org/10.1144/SP340.2>.
- Stephenson, R., Stovba, S. (2022). Review of the main Black Sea rifting phase in the Cretaceous and implications for the evolution of the Black Sea lithosphere. *Journal of Geodynamics*, 149, 101891.
- Stovba, S.M., Khriachtchevskaia, O.I., Popadyuk, I.V. (2009). Hydrocarbon Bearing Area in the Eastern Part of the Ukrainian Black Sea. *The Leading Edge*, 29 (9), 1042–1045.
- Stovba, S.M., Khriachtchevskaia, O.I., Popadyuk, I.V. (2013). Crimea and Ukrainian Eastern Black Sea basin as an inverted Early Cretaceous rift system. *Abstracts of Darius Programme, Eastern Black Sea – Caucasus Workshop, 24–25 June, Tbilisi, Georgia*, 65–67.
- Stovba, S.M., Popadyuk, I.V., Fenota, P.O., Khriachtchevskaia, O.I. (2020). Geological structure and tectonic evolution of the Ukrainian sector of the Black Sea. *Geophysical journal*, 5, 42, 53–106. DOI:10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215072
- Stovba, S.M., Popadyuk, I.V., Khriachtchevskaia, O.I., Fenota, P.O. (2017a). The Ukrainian Sector of the Black Sea and Crimea: the Atlas of Subcrop Maps and Palaeogeographical Reconstructions. *Abstracts of EAGE conference Geoinformatics, Kyiv*, 20–24. DOI: 10.3997/2214-4609.201701799
- Stovba, S.M., Popadyuk, I.V., Khriachtchevskaia, O.I., Fenota, P.O. (2017b). Crimea and Ukrainian Black Sea: the origin, tectonics and evolution. *Abstracts of EAGE conference Geoinformatics, Kyiv*, 577–581. DOI: 10.3997/2214-4609.201701798
- Tari, G., Fallah, M., Kosi, W., Schleder, Z., Turi, V., Krezsek, C. (2015). Regional Rift Structure of the Western Black Sea Basin: Map-View Kinematics. In: *Petroleum Systems in "Rift" Basins*, 372–395. DOI: 10.5724/gcs.15.34.0372
- Tectonics of Ukraine. (1988). S.S. Kruglov, A.K. Tsytko (Eds.). Moscow: Nedra, 254 p. [in Russian]
- Zonenshain, L.P., Le Pichon, X. (1986). Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins. *Tectonophysics*, 123, 181–211.

Надійшла до редколегії 14.02.23

S. Stovba, Dr.Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: stovbasm@gmail.com;
S.I. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine,
32 Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine;
Institute of Geological Sciences of the Polish Academy of Sciences, Krakow, Poland;
P. Fenota,
E-mail: ppreview6@gmail.com;
JSC UkrGasVydobuvannya, 26/28, Kudryavska str., Kyiv, 04053, Ukraine;
A. Tyshchenko, PhD (Geol.), Associate Prof.,
E-mail: aptyshchenko@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
JSC UkrGasVydobuvannya, 26/28 Kudryavska Str., Kyiv, 04053, Ukraine;
D. Vengrovich, PhD (Phys.-Math.),
E-mail: vengrovich@gmail.com;
S.I. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine,
32 Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine;
O. Khriashchevska, PhD (Geol.),
E-mail: chevaska2016@gmail.com;
SPK-GEO LLC, Kyiv, Ukraine

CRETACEOUS RIFTING IN THE GEOLOGICAL HISTORY OF THE UKRAINIAN SECTOR OF THE BLACK SEA

Within the Ukrainian sector of the Black Sea, the Albian-Cenomanian rift faults formed three large rift basins, which consisted of a system of grabens and half-grabens. One of the sublatitude rift basins occupied the modern Karkinit Trough, Krylov-Zmiiny Uplift, Gubkin Ridge and the Sulina Depression on the Odesa Shelf. The second sublatitude basin occupied the modern Tetyaev High, Sorokin Trough, Marine Continuation of the Crimean Folds and, apparently, the Crimean Mountains. The third rift basin extended from the northwest to the southeast and encompassed the Euxinian Graben, Andrusov Ridge, Eastern Black Sea Basin, and Shatskiy High. The greatest depth of the base of the rift sequence is observed in the central part of the Western Black Sea Basin, where it is 15.5–16.5 km. In the Eastern Black Sea basin, the maximum depth is 12.5–13.5 km. The shallowest depths of the base of the rift sequence are characteristic of the Kalamit Swell and the Marine Continuation of the Crimean Folds. During the Cenozoic phases of compression, almost all rift (half)grabens underwent intense folding and vertical movements from several hundreds of meters to 4–5 km. At the same time, most of the rift faults underwent partial or complete inversion.

Keywords: Black Sea, Odesa Shelf, Western Black Sea Basin, Eastern Black Sea Basin, Andrusov Ridge, rifting, rift structures.

УДК 550.372/373+551.24.055

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.07>

Т. Бурахович, д-р геол. наук,

E-mail: burahovich@ukr.net;

А. Кушнір, д-р геол. наук,

E-mail: anton@ukr.net;Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
просп. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03680, Україна

ІСТОРІЯ, СУЧАСНИЙ СТАН ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ГЕОЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В УКРАЇНІ

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

Розглянуто сучасний стан та перспективи розвитку геоелектромагнітних методів. Обговорено проблеми та способи їх розв'язання, нові ідеї та завдання. Проаналізовано сучасні експериментальні методики спостережень, універсальні програмні комплекси їх обробки, методику побудови тривимірних моделей різних геолого-тектонічних одиниць України. Наведено результати геолого-геофізичної інтерпретації регіональних та локальних тривимірних моделей. Виявлено геоелектричні неоднорідності у земній корі та верхній мантії України, які характеризуються аномально низькими та аномально високими значеннями електричного опору. Зони високої електропровідності, що виходять на поверхню, визначаються субвертикальною неоднорідністю та утворюють гальванічно пов'язану систему. Вона просторово корелює з глибинними розломами різного рангу, що виділені за геологічними даними. Природа аномалій електропровідності на глибині до 2,5 км зумовлена наявністю асоціації електропровідних мінералів (сульфідів, графіту) у зонах метасоматичної переробки порід, що ведуть до утворення рудної мінералізації (уран, золото, рідкісні метали). У земній корі на глибинах 5–30 км і верхньої мантії 50–120 км, найімовірніше, відображають сліди впливу сучасних мантіїних флюїдів. Все частіше за останніми даними природу аномалій розглядають як результат спільної діяльності електронного та іонного типів електропровідності. Аномалії електропровідності земної кори та верхньої мантії свідчать про можливі зони проявів геодинамічної активізації, а глибинні розломи визначаються зонами підвищеної проникності, якими крізь літосферу відбувається розвантаження мантіїних флюїдів. Зокрема висвітлено зв'язок аномалій електропровідності на території України з процесами формування нафтогазових і рудних родовищ корисних копалин.

Ключові слова: геоелектромагнітні методи, інтерпретація тривимірної моделі, аномалії електропровідності, корисні копалини.

Постановка проблеми. Проблема дефіциту енерго-ресурсів особливо у воєнний та повоєнний час вимагає нових підходів, які могли б узагальнити всю наявну інформацію про фізико-хімічні процеси утворення і накопичення вуглеводнів, а також їх проявах у фізичних полях. Як відомо, природні явища, що спостерігаються в земній корі, зумовлені взаємодією екзогенних і ендегенних процесів, пов'язаних із висхідними потоками флюїдів від впроваджених у кору мантіїних діапірів або розігрітих ділянок мантії. Це веде до формування вуглець-, сульфід- та залізовмісних метасоматитів, а також до утворення рудних та нафтогазових родовищ. Багато вчених дотримуються думки, що ці перетворення за своїм характером глибинні та спричинені флюїдними процесами і дегазацією земних надр. Остання нерозривно пов'язана з вертикальними і субвертикальними зонами руйнування гірських порід, які проявляються як зони, розущільнення, концентрації напружень і тріщинуватості. Вони мають особливі, найчастіше досить контрастні, геофізичні властивості. Важливо досліджувати всі можливі фізичні параметри, доступні для польового та лабораторного експерименту, включаючи розподіл електричних властивостей, який пов'язаний зі складом, станом гірських порід і глибинними процесами в надрах земної кори і мантії, та оцінюється методами глибинної геоелектрики.

Методи дослідження геоелектричної будови земних надр базуються на вивченні індукції зовнішнього іоносферно-магнітосферного електромагнітного поля Землі в середовищі, що характеризується високою електропровідністю порівняно з провідністю атмосфери. Метод магнітотелуричного зондування (МТЗ) використовується у випадку горизонтально-шаруватого середовища, яке не містить локальних неоднорідностей електропровідності. З іншого боку, метод магнітоваріаційного профілювання (МВП) ґрунтується на аналізі індукції первинного поля в локальних неоднорідностях середовища. В основі МТЗ та МВП методів лежить індукційний принцип, що базується на явищі скін-ефекту – пропорційній залежності

глибини проникнення електромагнітного (ЕМ) поля від періоду його коливань.

Проходить час, і частина уявлень про глибинні геофізичні феномени переглядається завдяки використанню сучасних експериментальних даних, появі нових ідей інтерпретації та розвитку інструментів дослідження розподілу фізичних параметрів у надрах Землі. Сучасні експериментальні геоелектричні дослідження із застосуванням новітньої апаратури, обробка їх результатів на основі універсальних пакетів програм та інтерпретації даних для тривимірно-неоднорідних (3D) середовищ, можуть забезпечити виявлення геоелектричних неоднорідностей та вивчення літосфери України, її тектонічних особливостей, а також зон прояву геодинамічних процесів, що досліджуються з погляду формування та розміщення родовищ і рудопроявів корисних копалин, зокрема горючих.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Застосування методів глибинної геоелектрики в історії ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка та його періодичного фахового видання "Вісник. Геологія" тісно пов'язані з іменами відомих випускників, учених, викладачів та загалом обдарованих фахівців геофізиків. До сьогодні залишаються актуальними та перспективними при пошуках нафтогазових покладів в умовах тонкошаруватого середовища проблеми, які досліджував А.А. Гроза, а саме, розвиток теорії нестаціонарних ЕМ полів у електропровідних середовищах та розробку методів геоелектричних досліджень земних надр. Його співавтором та послідовником є М.В. Рева. Потужний внесок у розвиток загальної теорії ЕМ зондувальних систем та імпедансних вимірів у методах геоелектромагнетизму, а також дослідження інтегральної кінематики ЕМ збурень у дифузійній області, швидкісних параметрів в георадарних та томографічних ЕМ системах, особливостей та систем ЕМ зондувань у середовищах з дисперсією зробив В.М. Шуман для розв'язання існуючих фундаментальних проблем сучасної геофізики.

© Бурахович Т., Кушнір А., 2023

Наукові інтереси Сергія Миколайовича Кулика були тісно пов'язані з вивченням глибинної будови земної кори і верхньої мантії МТЗ, глибинним МТЗ (ГМТЗ) та МВП. Він зробив вагомий внесок у проведення експериментальних досліджень як на території України, так і за її межами, плідно працював над розвитком методів обробки та інтерпретації експериментальних даних, узагальненням та побудовою геолого-геоелектричних моделей, проведенням їх комплексної інтерпретації. До наукової школи Сергія Миколайовича відносять себе автори даної статті та їх колеги: Є.М. Тонковид, Б.І. Ширков, В.А. Ільєнко. Одним з провідних учених України в галузі застосування ЕМ полів для пошуків родовищ корисних копалин та прогнозування землетрусів, розробником комп'ютеризованих геофізичних технологій та апаратурних комплексів був В.І. Трегубенко.

Викладаючи лекції на кафедрі геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка, С.М. Кулик згадував про засновника теорії класичної магнітотелурики Марка Наумовича Бердичевського: "Дитинство, доросле та наукове життя Марка Наумовича були тісно пов'язані з Україною та Києвом. Його однокурсник Є.Г. Коровніченко, який згодом викладав курс сейсморозвідки в Київському університеті, розповідав, що М.Н. Бердичевський був непересічною особистістю, ветераном війни, старшим другом. Він любив читати вірші біля вікна в коридорах другого чи третього поверху Червоного корпусу (в той час там був факультет геології) і сам їх писав". М.Н. Бердичевський був провідним ученим світу, який працював не тільки над розробкою теоретичних основ та методів цифрової обробки МТ та МВ спостережень, геологічною інтерпретацією кривих ЕМ зондування в умовах неоднорідних середовищ, розвитком методу глобального частотного зондування, але й організував і очолював більшість експериментальних проєктів, спрямованих на виявлення електропровідних шарів у земній корі та верхній мантії, а також підвищення геологічної ефективності електророзвідки. У повоєнній Україні ця галузь швидко розвивалася. Внесок Марка Наумовича в усі результати української геоелектрики був вирішальним і вагомим (*Berdichevsky and Dmitriev, 2008*).

Майбутній розвиток ЕМ методів, означений Володимиром Миколайовичем Шуманом (Шуман, 2012), залишається перспективним та актуальним завданням наукових досліджень. Багато його ідей значно випередили свій час. Володимир Миколайович проаналізував ключові положення геоелектродинаміки, важливі з погляду їх застосування, зокрема, з урахуванням фізичного та математичного аспектів проблеми, уточнив деякі положення імпедансного підходу в сучасній геоелектриці (Шуман і Савин, 2011). Фактично він передбачив майже всі теоретичні і технічні аспекти сучасного стану та розвитку ЕМ зондуючих систем на десятиліття вперед. Підкреслив необхідність заміни "класичної" електродинамічної парадигми на парадигму фрактальної електродинаміки нестійкого середовища, яка об'єднує фрактальну геометрію і теорію електромагнетизму. Зазначив, що застосування теорії фракталів, детермінованого хаосу, масштабної інваріантності (скейлінгу) й дробних операторів відкриває додаткові можливості і перспективи в обробці даних спостережень та підвищує інформативність зондуючих систем, орієнтуючи їх на одержання якісно нової інформації про геосередовище. На жаль, сьогодні цей напрям складно реалізувати в повному обсязі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Територія України належить до однієї з найбільш вивчених ЕМ методами регіонів Європи. Це не

лише дослідження інститутів Академії наук (роботи О.П. Бондаренко, І.І. Рокитяньського, С.М. Кулика, І.М. Логвинова, Я.С. Сапужака, А.І. Білінського, В.М. Шумана, В.В. Белявського, Є.М. Шеремета та ін.), а й в основному роботи геофізичних організацій геологічних служб України, проведені під керівництвом провідних геоелектриків А.І. Інгерова, В.І. Трегубенка, С.Г. Кремера, І.А. Свириденка, за даними яких отримано понад дві з половиною тисячі пунктів експериментальних спостережень методами МТЗ і МВП. З метою пошуку рудних і горючих корисних копалин проведено аудіо-МТЗ (АМТЗ) дослідження на локальних ділянках Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), Донбасу, Українського щита (УЩ), Переддобрудзького прогину (ПП) та Скіфської плити (СП). У результаті АМТЗ спостережень складено моделі золоторудних і нафтових родовищ та здійснено пошук перспективних ділянок у межах структурних зон. Всі ЕМ дослідження в широкому діапазоні періодів показали, що в геоелектричному аспекті як земна кора, так і верхня мантія території України є істотно неоднорідними (*Ingerov et al., 1999; Белявский и др., 2001*).

Моделі розподілу аномалій електропровідності у земній корі та верхній мантії різних геологічних регіонів України розглядалися у 80-х роках ХХ ст. у межах двовимірних апроксимацій середовища. Існували уявлення, наприклад, що для побудови нормальної кривої позірною питомого опору УЩ, необхідно використовувати дані ГМТЗ, зареєстровані на території Волино-Подільської плити (ВПП), у зв'язку з тим, що передбачалася відсутність суттєвих глибинних горизонтальних неоднорідностей електропровідності. А вже на початку ХХІ ст., коли було накопичено великий обсяг експериментальних даних (*Ingerov et al., 1999; Белявский и др., 2001*) і з'явилися нові методи вирішення прямих та зворотних задач для складних середовищ (авторські права на програмну підсистему SW-IEM3D належать Петеру Вайдельту, математичне моделювання, 1977–1993 рр.), були побудовані глибинні квазітривимірні плівкові моделі (*Burakhovich et al., 2001*). Сумісний аналіз квазітривимірних плівкових і двовимірних моделей дав об'ємне уявлення про глибинний розріз кори та мантії Землі. Виділено та побудовано глибинні геоелектричні моделі земної кори та верхньої мантії території України, що містять області з аномально високою електропровідністю: Коростенська (H=15 км, S=500 См), Гайворон-Добровеличківська (H=0,1 км, S=2000 См), Кіровоградська (H=10–25 км, S=100–20000 См), Приазовська (H=1–2 км, S=2000 См), Волинська (H=2,5 км, S=1000 См), Чернівецько-Коростенська (H=15 км, S=1000 См; H=70 км, S=2000 См), Яворівська (H=15 км, S=1000 См; H=70 км, S=1200 См), Донбаська (H=2 км, S=500–20000 См; H=10 км, S=1000–10000 См), Тарханкутська (H=10 км, S=5000 См; H=60 км, S=5000 См), Керченська (H=2 км, S=2500 См; H=5 км, S=5000 См), Гірського Криму (H=2 км, S=1000 См), Степового Криму (H=5 км, S=5000 См), Добрудзьська (H=15 км, S=5000 См; H=70 км, S=1000 См), Карпатська (H=15 км, S=20000 См; H=70 км, S=6000 См), де H – глибина залягання плівки, S – сумарна позовжня провідність. Експериментальні дані, які були використані, не мали достатньої точності для побудови детальніших об'ємних тривимірних моделей. Крім того, існуючий на сьогодні результат геоелектричної моделі у вигляді розподілу S земної кори і верхньої мантії території України залишає невирішеними багато питань, а саме: не визначено розподіл значень питомого електричного опору (ρ) гірських порід та потужності електропровідних об'єктів; не оцінено рівень впливу на отримані

результати електричних властивостей поверхневих структур, тобто не розраховувалася взаємоіндукція, а також вплив та взаємоіндукція глибинних регіональних аномалій та локальних об'єктів; не пояснена природа високої електропровідності і зв'язок геоелектричних властивостей з геологічними і тектонічними об'єктами.

Відповіді на ці питання можуть бути отримані завдяки побудові об'ємних моделей розподілу питомого опору в земній корі та верхній мантії. Нові результати можна досягти лише із сучасним підходом до експериментальних спостережень, обробки даних та методики інтерпретації. Геоелектрика в Україні нині переживає період переходу від вже вичерпаних можливостей існуючих методів досліджень та уявлень про горизонтально-шарувату структуру середовища. Сучасна цифрова апаратура дає змогу застосовувати нову систему спостережень та обробки даних. З цього погляду найбільше підходить методика синхронної реєстрації п'яти компонент поля для підмножин мережі пунктів спостережень. Однак на цьому етапі ми перебуваємо на самому початку шляху. Сучасні дані ЕМ поля є фундаментом для якісної та кількісної інтерпретації та стають основою для побудови різного роду 3D геоелектричних моделей (Бурахович і др., 2015; Шеремет і др., 2016).

Мета – дослідження особливостей будови земної кори та верхньої мантії на основі тривимірної моделі розподілу електричного опору, що побудована за експериментальними даними ГМТЗ і МВП; пояснення природи аномалій високої електропровідності за геолого-геоелектричною інтерпретацією моделей у зв'язку з пошуком перспективних на корисні копалини структур різних регіонів України.

Експериментальні спостереження та їх обробка. Всі сучасні польові експерименти було зроблено за методикою синхронного спостереження МТ/МВ полів з використанням двох довгоперіодних цифрових апаратурних комплексів серії LEMI-417 (розробка Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН України та Державного космічного агентства України) з ферозондовими магнітометрами. Їх головними перевагами є дуже низький часовий дрейф ($< \pm 5$ нТл/рік) і висока точність вимірів (0,02 % протягом двох років), що є надзвичайно ефективним при глибинних зондуваннях земної кори і верхньої мантії. Синхронізація станцій здійснювалася за допомогою GPS приймача. Дослідження проводились як у профільному, так і площинному варіантах. Відстань між пунктами від 1 до 5–10 км (іноді до 30 км) та час спостереження (від 10 год до 40 діб) на кожній окремій точці визначались поставленими завданнями та реальними польовими умовами проведення експерименту.

Більшість сучасних методів оцінювання передавальних операторів ґрунтовані на загальних принципах гармонічного аналізу і робастних способах лінійного оцінювання в частотній області. Після відбракування некондиційних записів та придушення завад (препроцесінг) проводиться послідовний Фур'є-аналіз відрізків послідовностей варіацій і накопичення лінійних рівнянь, що пов'язують спектральні компоненти МТ полів, для кожного інтервалу періодів оцінювання. Отримані надлишкові системи рівнянь вирішуються частинами з подальшим осередненням чи цілком. Такий підхід реалізовано за допомогою двох широковідомих та добре оцінених у геоелектричному співтоваристві програмних комплексів: PRC_MTMV, що забезпечує спільне перешкодозахищене оцінювання імпедансу та комплексних індукційних параметрів за синхронними МТ/МВ-записами, та PTS. Завдяки сучасному підходу до обробки експериментальних синхронних

МТ/МВ зондувань були отримані криві ГМТЗ (амплітудні та фазові позірного питомого опору ρ_n) для широкого діапазону періодів 10–10000 с, типери для періодів 50–4000 с та горизонтальний магнітний тензор [M] на періодах від 10 до 10000 с у різних геологічних структурах України (на сьогодні загальна кількість становить 207 пунктів). Хоча обробка дозволяє отримувати діаграми передавальних операторів МТ поля, візуалізація у вигляді наборів псевдорозрізів найінформативніших компонент функцій відгуку дає можливість наочного відображення результатів, особливо при виявленні в просторі локальних неоднорідних зон високої електропровідності при профільних дослідженнях (Бурахович і др., 2015; Шеремет і др., 2016; Ніколаєв та ін., 2019; Ширков та ін., 2013; Ільєнко та ін., 2019, 2020; Кушнір та ін., 2021; Бурахович та ін., 2022').

Аналіз та інтерпретація тривимірних геоелектричних моделей. Найбільш вживаною програмою моделювання ЕМ полів Землі вважається Mtd3fwd, яка використовується для обчислень електричної і магнітної компонент МТ поля для тривимірних аномальних тіл, що збудені плоскою ЕМ хвилею. Алгоритм 3D-моделювання базується на інтегральній формі рівняння Максвелла для кінцево-різницевої апроксимації магнітного поля другого порядку. При моделюванні точність розрахунку компонент ЕМ поля становить 0,001 %.

Основними елементами методики моделювання можна вважати: задані значення питомого електричного опору "нормального" горизонтально-шаруватого розрізу надр, на фоні яких будуються об'ємні неоднорідності; періоди геомагнітних варіацій, для яких розраховано модель; апріорно заданий розподіл ρ приповерхневого провідного шару; неоднорідний глибинний регіональний розподіл ρ та ін.

Методика 3D-моделювання насамперед потребує підбору МВП параметрів, а потім уточнення отриманої моделі за даними МТЗ. Це відповідає тому, що спочатку ми досліджуємо моду електромагнітного процесу, яка формується за результатом індукції у провідниках та пов'язана з концентрацією струмів в аномальних зонах низького ρ . Аномальні поля геомагнітних варіацій суттєво залежать і від розподілу ρ вмісного середовища, отже, від електропровідності на великих глибинах. Індукційна мода принципово відрізняється від гальванічної тим, що вона слабо реагує на зміни ρ порід із високим опором. Прийняте значення цього параметру до глибини 160 км становить 1000 Ом·м і розглядається як значення, яке умовно характеризує ізолятор.

Найдоступнішим способом оцінки параметрів середовища була та залишається 1D-інверсія геоелектричних даних. Найбільш повний за глибиною геоелектричний розріз можна отримати з 1D-інверсії узагальнених кривих ρ_n , побудованих шляхом поєднання з кривими магнітоваріаційного зондування (МВЗ) на опорній геомагнітній обсерваторії (Львова, Києва, Одеси, Корця та Яструбівки (Крим)) з кривою ГМТЗ досліджуваного регіону (Kushnir et al., 2021). За даними МВЗ ρ_n змінюється від декількох сотень Ом·м у верхній мантії до менш ніж 0,1 Ом·м для глибини від 700 до 2000 км у нижній. Верхня мантія під Передкарпатським прогином, Причорноморською западиною і СГ значно більш провідна, ніж під УЩ. Водночас дані якісно узгоджуються з "нормальними" розрізами до глибини приблизно 700 км.

Зазвичай розраховується велика кількість моделей з різними варіантами як просторових параметрів аномальних структур, так і значень ρ у земній корі та верхній мантії. Спеціально розглядаються альтернативні моделі.

Підбір розподілу ρ вважається завершеним, коли розраховані модельні ЕМ параметри задовольняють експериментальним даним, наприклад: по-перше, похибка типперів становить близько 10–20 % за модулем та до 20° за напрямком; по-друге, у переважній більшості зберігається співвідношення кривих ρ_n за поляризаціями; по-третє, для більшості експериментальних пунктів підбирались максимально наближена форма та рівень за ρ_n вздовж профілів для різних періодів (похибка спостережених та модельних даних становить від кількох до 30 %); у межах планшету суттєва похибка допускається у майже 10 % пунктів кривих МТЗ. Останнім етапом побудови геоелектричної моделі можна вважати її інтерпретацію з метою отримання фізико-геологічного тлумачення для застосування в таких важливих областях як вивчення перспектив пошуку рудопояв корисних копалин, нафтогазоносності та сейсмічної небезпеки.

На сьогодні з використанням сучасного польового матеріалу побудовано тривимірні моделі різних геолого-тектонічних регіонів території України. До регіональних можна віднести геоелектричну модель земної кори та верхньої мантії УЩ (Бурахович *и др.*, 2015) та його оточення, яка поділена на три частини: Чернівецько-Коростенська аномалія електропровідності (АЕ) у Подільському і Росинському мегаблоках, Кіровоградська АЕ в Інгільському мегаблочі та Інгільсько-Криворізьській шовній зоні (ІКШЗ), західна частина Приазовського мегаблока, а також моделі північної Добруджі та ПП (Старостенко *и др.*, 2013), Кримсько-Чорноморського регіону (Кушнір та Бурахович, 2021; Бурахович та ін., 2021). Локальні моделі пов'язані з конкретними структурами, Кіровоградського рудного поля (КРР) (Николаев *и др.*, 2013), Голованівської шовної зони (ГШЗ) (Ширков та Бурахович, 2017; Бурахович та ін., 2015), унікальних метабазитових утворень (Тарасівської та Троянківської структур ГШЗ) (Кушнір та ін., 2019), сейсмонезбезпечних ділянок – Могилів-Подільської та Новомиргородської (Кушнір *и Бурахович*, 2012), центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів УЩ (Бурахович та ін., 2022²), та о. Зміїний (Burakhovich *et al.*, 2015).

Основний результат геоелектричних досліджень території України полягає в тому, що спостерігається особливе природне явище – висока електропровідність, яка концентрується в окремих ділянках земної кори і верхньої мантії і формує зони різної інтенсивності і глибини залягання. Ці зони по-різному характеризують геологічні регіони.

УЩ. Існуюча на сьогодні регіональна тривимірна геоелектрична модель західної частини УЩ (Волинський, Подільський, Росинський, Бузький мегаблоки) підтвердила складну неоднорідну будову надр. На північному заході УЩ на границі Волинського та Росинського мегаблоків в земній корі на глибині між 15 та 30 км розташована Коростенська АЕ. Середнє значення ρ дорівнює 30 Ом·м. Просторово ця структура збігається з Коростенським плутоном. На заході УЩ у тому ж інтервалі глибин (h) виявлено Чернівецько-Коростенську АЕ, що характеризується великою площею та складною будовою. Частина аномалії з $\rho=5$ Ом·м розташована в межах Росинського та Подільського мегаблоків h від 15 до 30 км і містить об'єкт високого $\rho \approx 1000$ Ом·м. Західна частина цієї структури, що має середній $\rho \approx 20$ Ом·м, виходить за межі УЩ і простягається в двох напрямках – на південь та південний схід уздовж Подільської ЗР до ГШЗ. Зони глибинних розломів (ЗР): Ольшанського, Великоречицького (продовження Ольшанського), Брусилівського, Погребищенського, Віленського і Кочерівського проявилися в АЕ.

Загалом регіону притаманна висока електропровідність і на астеносферних глибинах від 50–70 до 125 км з $\rho \approx 25$ –50 Ом·м. У південно-західній частині УЩ виявлено провідник з верхньою кромкою на глибині 50–70 км, який диференційовано за ρ від 48°00' пн.ш.: на північ до 50°00' пн.ш. (південь Росинсько-Бузького мегаблока УЩ) $\rho=50$ Ом·м, на південь (схил УЩ і частково Причорноморська западина) $\rho=25$ Ом·м. Відкориговано межі мантийного провідника. На сході він трасується частково за Тальнівською і Одеською ЗР, на півночі поступово зміщується вздовж Хмельницької ЗР, де далі йде субширотно і відповідає уступу поверхні Мохо. На півдні проходить по Кишинівській ЗР на широті південної границі УЩ, на заході занурюється до глибини 90–100 км.

Аналіз детальної 3D-моделі центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської ЗР заходу УЩ показав, що з великої кількості приповерхневих аномалій і низьким ρ від 5 до 100 Ом·м більшість занурюється до 500 м, і тільки декілька перетинають глибину 1 км та простежуються до 11 км. Встановлено, що існують зв'язки між електропровідністю та структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської, Немирівської ЗР, Самгородського розлому та Кочерівського синклінію. Підтверджено та деталізовано регіональні АЕ як у глибинній частині земної кори, так і у верхній мантії, частина Звіздаль-Заліської ЗР проявилася на глибинах 15–30 км як зона контакту аномальних високого та низького ρ . АЕ приурочені до видовжених зон метасоматозу і районів поширення графітизованих порід, частина поверхневих АЕ відповідає областям кори вивітрювання. Більшість АЕ збігається з рудопоявами, рудоносними полями і родовищами корисних копалин.

Центральна частина УЩ об'єднує із заходу на схід – ГШЗ, Інгільський мегаблок та ІКШЗ, відрізняється високою електропровідністю по всьому розрізу земної кори, і це свідчить як про аномально високу проникність порід палеопротерозойського блока, так і про сучасні прояви активізації. Розрахунки геоелектричної 3D-моделі дозволили виявити різну просторову орієнтацію течій телуричних струмів у центральній частині УЩ – субширотну та субмеридіональну, що відповідає поверхневим та глибинним АЕ.

На фоні "нормального" розподілу поверхневих відкладень у ГШЗ виявлено дві аномалії із субширотною орієнтацією у просторі у самій верхній (до 100 м) частині розрізу, одна з яких може бути південно-західним продовженням Суботсько-Мошорської ЗР. Південніше за 48°00' пн.ш. розташована система провідників субмеридіонального простягання, яка збігається з частинами Ємилівської, Первомайської та Звенигородсько-Братської, Західно-інгулецької та Криворізько-Кременчуцької ЗР.

У межах КРР та ГШЗ виділяється розгалужена мережа провідників з низьким $\rho=50$ Ом·м на h від 100 м до 2,5 км, які приурочені до окремих частин Звенигородсько-Братської-Мошоринської, Ємилівської, Лелеківської, Конкської, Ємилівської, Тальнівської, Первомайської та Кіровоградської ЗР. На цих глибинах простежуються провідники ($\rho=10$ Ом·м) Західноінгулецької (між Чигиринським та Долинським масивами гранітоїдів) та Криворізько-Кременчуцької ЗР.

На глибинах 5–10 і більше км АЕ (навіть якщо вони просторово і збігаються з розташуванням глибинних ЗР) із субвертикальних із збільшенням глибини перетворюються на субгоризонтальні провідні структури (шари). Показним виятком на h від 5 до 20 км є провідник розміром 5 км×45 км, розташований у центральній частині Новоукраїнського масиву. А також ділянка перетину

Первомайської з Тальнівською ЗР в h 10–20 км та, можливо, східне продовження Суботсько-Мошоринської ЗР у межах ІКШЗ та північної частини Криворізько-Кременчуцької ЗР на глибинах від 10 до 30 км. Глибинна АЕ (10 км) у вигляді складної субширотної зони у надрах південного схилу УЩ виділяється в районі збіжності основних ЗР Первомайського, Кіровоградського, Західноінгульського та Криворізько-Кременчуцького. Окремою провідною субмеридіональною структурою південніше $48^{\circ}00'$ пн.ш. проявляється Тальнівська ЗР. Результати тривимірного моделювання базит-метабазитових структур Ятранського блока ГШЗ – Тарасівської та Троянківської, показали, що такі структури у геологічних межах в АЕ не проявилися. Але ЗР, що оконтурюють та перетинають їх, виявилися складними аномальними об'єктами як у плані, так і за глибиною. У геоелектричному відношенні струмові структури двох масивів суттєво відрізняються. Так, Тарасівську структуру субширотно перетинають АЕ з різним ρ , що виділені на трьох h : 0–100 м з ($\rho=10$ –250 Ом·м); 2–7 та 7–10 км з ($\rho=10$ –250 Ом·м). АЕ Троянківського масиву проявилися на чотирьох h : 0–100 та 150–200 м з ($\rho=5$ –100 Ом·м); 2–4 та 4–10 км з ($\rho=50$ –250 Ом·м). Об'єднуючою рисою двох структур є прояв низьких значень ρ від 5 до 100 Ом·м саме у їх геологічних межах.

Західна границя регіональної Кіровоградської АЕ (h від 20 до 25 км з $\rho=10$ –50 Ом·м) розташована у зоні давнього шва Херсон–Смоленськ, тоді як в h 25–30 км із $\rho=50$ Ом·м відповідає Кіровоградській глибинній ЗР, сама ж аномалія охоплює територію, що включає ІКШЗ, і являє собою витягнуту з півдня на північний схід структуру з просторовими розмірами від 50 до кількох сотень км і тільки на півдні УЩ змінює своє простягання на субширотноє вздовж Конської ЗР.

Експериментальні дослідження та результат тривимірного моделювання свідчать про те, що напевно чи існує єдиний провідник у верхній мантії в центральній частині УЩ. Швидше за все, можна припустити існування декількох локальних неоднорідностей: біля м. Кропивницький, у зоні перетину Кіровоградської та Суботсько-Мошоринської ЗР, виділяється провідник субмеридіонального простягання; дві субширотні високопровідні зони фрагментарно проявляються вздовж трансекту Херсон–Смоленськ. До речі, над першою ділянкою в земній корі виділено провідник h 5–20 км з 10 Ом·м. Розміри цих зон у широтному напрямку майже такі ж, як і ширина Новоукраїнського масиву. Через відсутність експериментальних спостережень в області великих періодів, на жаль, важко встановити, чи існують на північ уздовж шва Херсон–Смоленськ такі ж ізольовані високопровідні тіла у верхній мантії. Більш вірогідно астеносфера на глибинах від 50 км до 120 км отримана в південній частині Інгульського мегаблока. Його північна границя має проходити південніше $47^{\circ}20'$ пн.ш. На схід від $32^{\circ}00'$ сх.д. вона сягає $47^{\circ}40'$ пн.ш. Максимальне поширення на північ спостерігається вздовж Кіровоградської АЕ, і приурочена вона до віялоподібнозбіжних ЗР – Західноінгульського, Кіровоградського, трансрегіонального шва Херсон–Смоленськ та Первомайського.

Природа АЕ на глибині до 2,5 км зумовлена наявністю асоціації електропровідних мінералів (сульфідів, графіту) у зонах метасоматичної переробки порід, що ведуть до утворення рудної мінералізації (уран, золото, рідкісні метали). АЕ у земній корі на h 5–30 км і верхньої мантії 50–120 км, наймовірніше, відображають сліди впливу мантійних флюїдів. Дедалі частіше, за останніми даними, природу аномалій розглядають як

результат спільної діяльності електронного та іонного типів електропровідності.

Східна, в геоелектричному сенсі, частина УЩ – це Середньопридніпровський та Приазовський мегаблоки з ОПШЗ. Архейський Середньопридніпровський мегаблок, не порушений процесами протерозойської тектономагматичної активізації, характеризується аномально високим ρ . 3D-модель вирізняється як зонами аномально високого ρ (північна частина Західноприазовського мегаблока – Вовчанський блок), так і аномально низького. Так у напрямку із заходу на схід найінтенсивніші АЕ: в районі ОПШЗ, Гуляйпільського та Андріївського блоків Західного Приазов'я, Центрального Приазов'я (h від поверхні до 2 км, $\rho \approx 10$ Ом·м у районі Азово-Павлоградської та Центральноприазовської ЗР і південної частини Андріївського блока; h від 2 до 10 км, $\rho=100$ Ом·м у районі Гуляйпільського, Андріївського блоків та ОПШЗ) та третя глибинна (h 10–50 км) низькоомна ($\rho \approx 100$ Ом·м) ділянка розташована біля межі Східного Приазов'я зі СП у районі Грузько-Єланчикської ЗР. За даними сейсмотомографії, у досліджуваному регіоні виділяються зони розшарування і, отже, області підвищеної проникності.

Кримсько-Чорноморський регіон. Уперше для Криму та прилеглих територій побудовано тривимірну геоелектричну модель земної кори та верхньої мантії за результатами експериментальних спостережень низькочастотного електромагнітного поля Землі, які було проведено у 2008–2013 рр. Інститутами Національної академії наук України (*Кушнір та Бурахович, 2021; Бурахович та ін., 2021*). Основним результатом аналізу отриманої моделі розподілу ρ є виявлення областей АЕ як у земній корі, так і у верхній мантії, які характеризуються різною провідністю і глибиною залягання, конфігурацією і по-різному характеризують геологічні структури.

Субвертикальні електропровідні зони чи контакти різного ρ переважно в приповерхневих шарах збігаються з розломними структурами, більшість таких об'єктів приурочено до границь між різними тектонічними елементами, такими як – СП і Гірський Крим, Північнокерченська і Південнокерченська зони та іншими розломами: Чонгарським, Мелітопольсько-Новоцаринським, Корсарсько-Феодосійським, Горностаєвським та Керченсько-Чкалівським. Як окрема потужна АЕ проявилася система розломів Миколаївського та Західнокримського. Глибше в земній корі та верхній мантії геоелектричні неоднорідності, навіть якщо їх межі просторово і збігаються з розташуванням глибинних ЗР, перетворюються в субгоризонтальні структури (шари) та проявляються в регіональній АЕ. Неоднорідність корових та мантійних високопровідних шарів може свідчити про високу проникність для глибинних флюїдів зон контактів.

Впевнено простежується глибинна субширотна структура в земній корі, яка на заході підтверджує та деталізує відому Тарханкутську АЕ, та продовжується через центральний Крим до північно-західної частини Керченського півострова. Припускається наявність у надрах північно-західного шельфу Чорного моря та в північно-східній частині Керченсько-Таманського прогину потужної субширотної аномалії на межі кора–верхня мантія, що оконтурює Кримський півострів. На південному сході виразно проявилася ізометрична АЕ у зоні нафтового родовища Субботіна. На жаль, остаточний варіант розташування північної границі геоелектричної астеносфери на глибинах 110–140 км, за існуючими на сьогодні експериментальними ЕМ спостереженнями, вибрати складно,

передбачаємо, що вона проходить в осьовій частині грабенів у зоні зчленування різновікових платформ.

Розглянутий матеріал впевнено свідчить про приуроченість проявів вуглеводнів до виділених за даними геоелектромагнітного зондування та тривимірного моделювання АЕ, які характеризуються субвертикальними каналами, що гальванічно пов'язані з осадовими відкладами або субвертикальними контактними зонами різного опору, що спостерігаються не тільки в земній корі, але і в шарах у верхній мантії (60–90 км, 110–140 км) та можуть зумовлювати надходження надглибоких флюїдів. Геоелектричні неоднорідності у земній корі та верхній мантії так чи інакше, але підтверджуються наявністю різних аномалій в інших геофізичних полях. Так, за результатами томографічного моделювання виділено зону низьких швидкостей, що інтерпретується як ослаблена ділянка в корі (Старостенко, Гинтов, 2018). Інтенсивні аномалії теплових потоків (Кутас, 2020) погоджуються з утворенням локальних вогнищ розтягання. Параметри співвідношень ізотопів $^3\text{He}/^4\text{He}$ свідчать про аномальність цього регіону. Передбачається, що шляхи проникнення мантійного гелію утворились у результаті молодшої активізації (Гордиенко, 2001). Загальне поглиблення на південь верхньої кромки субширотних ланцюгів АЕ відповідає сейсмоструктурній моделі, яка також характеризується нахилом ізоліній швидкостей пружних хвиль у південному напрямку, що узгоджується з нахилом шарів земної кори в моделі DOBRE-5 (Starostenko et al., 2015) на тих же глибинах.

Поза всяким сумнівом існує взаємозв'язок між проявами сейсмічності, нафтогазоносністю і геоелектричними неоднорідностями, які відображають сучасний стан земної кори і верхньої мантії та, ймовірно, сліди впливу мантійних флюїдів. Зони проявів надглибоких флюїдів, отримані за даними сейсмотомографії, аномалій високої електропровідності в земній корі і верхній мантії, підвищеного теплового потоку і поширення гіпоцентрів землетрусів, підтверджують зв'язок сейсмічності Криму з колізійними процесами (Старостенко, Гинтов, 2018).

ПП та Північна Добруджа. Витягнуті на сотні кілометрів провідники приурочені до глибинних розломів різного рангу та їх перетинів: у центральній частині ПП, крайового шва Кагульсько-Ізмаїлівського з Фрунзенським, Болградського, Чадир-Лунгського, частини Саратського та ін. Основний глибинний провідник складної конфігурації у земній корі та у верхній частині верхньої мантії приурочений до Кілійської зони південного борта ПП. Північний борт характеризується локальною провідною структурою в земній корі на зламі Чадир-Лунгського розлому. Північна границя провідного шару у верхній мантії розташована між Чадир-Лунгським і Болградським розломами та простягається у субширотному напрямку в акваторії Чорного моря. На глибині 20–100 км у моделі о. Зміїний виявлено субширотний провідник з $\rho=25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. АЕ займає положення між розломами: регіональним Печеніга–Камена, який, можливо, є продовженням у Чорному морі лінеамента Тейсейра–Торнквіста, на півдні і Кілійським на півночі. Можливо його гальванічне з'єднання з подібними зонами зниженого опору ПП на заході, а також з Тарханкутською АЕ і на сході (Burakhovich et al., 2015).

Підвищений тепловий потік, АЕ у верхній мантії і на різних глибинах у земній корі, позитивна мантійна аномалія гравітаційного поля, підняття покрівлі нижньої мантії, присутність низькошвидкісної області, що поширюється вгору від нижньої мантії, через зону розділу і середню мантію до перехідної зони верхньої мантії, прояви у верхній мантії субвертикальної мантійної

колонки, як наслідків глибинного флюїду, можна пояснити проявом мантійного плюму і пов'язаних з ним флюїдів (Старостенко і др., 2013).

Сучасні геоелектромагнітні дослідження. За результатами сучасних синхронних геоелектромагнітних досліджень отримано просторово-часову картину розподілу геомагнітних варіацій і електричного поля на поверхні Землі та розуміння геоелектричної структури розрізу окремих районів Карпатського регіону та ДДЗ.

Південний захід Українських Карпат. Намічені в результаті якісної інтерпретації АЕ у земній корі (Кушнір та ін., 2021, Бурахович та ін., 2022') відповідають розломній тектоніці та створюють ланцюг із чотирьох локальних різноорієнтованих ділянок, загальна вісь яких проходить поміж Закарпатським та Чорногоровським глибинними розломами, а в південній частині поміж останнім та Ужоським (можливо також розглядати варіант єдиної повздовжньо-неоднорідної електропровідної структури в межах уявлення про осьову зону Карпатської магнітоваріаційної аномалії). Неоднорідний розподіл електропровідності на глибинах верхньої мантії зафіксовано в регіоні Українських Карпат від Закарпатського прогину до Скибових покривів. Показано, що спостерігається загальне поглиблення верхньої кромки на північний схід від 40–60 км (Закарпатський прогин) до 90–100 км (Кросненського покриву) та різке поглиблення вздовж Поркулецького й Дуклянського покривів. Уздовж простягання внутрішньої і центральної зон Зовнішніх Карпат виділено три ділянки: північна характеризується поглибленням верхньої кромки та розгалуженням електропровідності за глибиною в напрямку на південь; центральна представлена неоднорідним коро-мантійним шаром; південна вирізняється впровадженням з півдня або майже вертикальним проникненням з 60 до 110 км. Отримані результати геоелектромагнітних досліджень добре збігаються з геотермічним районуванням, відповідають структурі літосфери за профілями ГСЗ та уявленням про сучасний геодинамічний розвиток надр.

ДДЗ. Насамперед це структура з поверхневими горизонтами, що характеризуються високою електропровідністю і суттєвою латеральною неоднорідністю.

Брагінсько-Лоевський виступ і Чернігівський блок. Результати якісної інтерпретації свідчать про наявність декількох АЕ, що відповідають як глибинним об'єктам (наприклад, східному закінченню Прип'ятської АЕ), так і неглибоким у верхній частині фундаменту (3–5 км), витягнутим уздовж вісі Чернігівського блока і близько 8 км на його південному борту. Як відомо, природа АЕ зумовлена взаємодією різноманітних геолого-геофізичних факторів. Найзначущими серед них є температура, наявність електрон провідних мінералів та флюїдів. АЕ Прип'ятського прогину, ймовірно, пов'язана із зонами можливого часткового плавлення у земній корі та верхній мантії, тому висунуто припущення саме про її флюїдний механізм (Белявський і др., 2001). Поклади нафти і газу тут пов'язують з палеозойським осадовим чохлам і докембрійським фундаментом. Тоді як Чернігівський блок ДДВ не розглядається як перспективний на нафтогазоносність, незважаючи на те, що тут виділено дві площі – Талалаївську і Никонівську. Їх надра характеризуються перетином активізованих розломів різної орієнтації, а також аномальною потужністю коромантійної суміші і розущільнених областей на поверхні фундаменту і на глибині 20–30 км, що підтверджується результатом якісної інтерпретації експериментальних даних МТЗ та МВП.

Північний борт Белгородсько-Сумського мегаблока. Частотні залежності передавальних операторів

MT/MB-методів, а саме мінімум на низхідній гілці кривих ρ_n у діапазоні періодів 600–3000 с, аномальність (вище 1,5) по компоненті M_{yy} горизонтального магнітного тензора, північно-східна орієнтація комплексного індукційного типпера з величиною, меншою за 0,2, практично у всьому частотному діапазоні відповідають провіднику на глибині близько 50–150 км. Аналіз теоретичних і експериментальних даних індукційних параметрів, отриманих при побудові тривимірної моделі Кіровоградської АЕ на $T=2000$ с, показав, що на глибині 50–160 км у верхах магніти спостерігається зниження ρ . Цей район також характеризується неоднорідним розподілом швидкості поширення поздовжніх сейсмічних хвиль.

Південний борт центральної частини ДДЗ. При дослідженні глибинної будови центральної частини південного борту ДДЗ, де Кіровоградська АЕ перетинає Лохвицький та Полтавський блоки, крім присутності поверхневого провідника, який простягається з північного заходу на південний схід та пов'язаний з поверхневою провідністю осадової товщі, просторово деталізована неоднорідність, що передбачається в глибинних горизонтах з верхньою кромкою на 20–30 км у середній частині профілю Несено–Іржавець–Абрамівка і відповідає АЕ.

Згідно з результатами 3D геоелектричного моделювання центральної частини УЩ саме на цих глибинах знайдено аномальні структури, які підтверджуються новими експериментальними MT/MB спостереженнями. Крім того, можлива деталізація раніше виділених нафтогазоносних ділянок, а саме перспективної Глидинцівської площі у фундаменті ДДЗ. Профіль досліджень проходить за її межами, на експериментальних даних є інформація про існування глибинного провідника, але підтвердити його наявність і параметри можна тільки в результаті подальшого моделювання. Також інформацію про існування іншого провідника, виділеного за результатами MTЗ на глибині 10–35 км, і про передбачуване за новими даними занурення його верхньої кромки до 20–30 км у південно-західному напрямку, можна підтвердити тільки тривимірним геоелектричним моделюванням. Виділена в даній роботі аномальна область частково збігається з перспективною Підгородською площею (Шеремет і др., 2016, с. 62).

Природа аномалії електропровідності, з одного боку, може бути пов'язана з тріщинуватими породами, за якими мігрують флюїди і утворюють родовища вуглеводнів, або, з іншого боку, пояснюється як результат "вуглеводневого дихання Землі" (Шеремет і др., 2016). Передбачається, що рідкі та газоподібні вуглеводні в осадову товщу могли постачатися з кореневого провідника графітової природи, що залягає в кристалічному фундаменті. Його просторове положення збігається зі зкупченнями нафти в осадовому чохлах, що їх перекриває. Однією із структур УЩ, з якою пов'язане просторове розташування графітізованих ділянок у породах фундаменту, є Криворізько-Кременчузька ЗР, яка проявляється в геомагнітних варіаціях Кіровоградської АЕ.

Отже, вивчення електромагнітних параметрів і природи аномалій електропровідності в надрах Землі дозволяє, по-перше, визначити сліди проходження глибинних флюїдів, по-друге, намітити взаємодію різних глибинних горизонтів і виявити перспективні на нафтогазоносність ділянки земної кори.

Висновки. Комплексування MTЗ і GMTЗ з AMTЗ створює нову технологію застосування ЕМ методів, що дозволяє вивчати геоелектричний розріз від перших метрів до сотень км і виконувати тривимірні побудови. При цьому доцільно будувати єдину початкову геоелектричну модель, яка одночасно відповідає узагальненій

кривій ЕМ зондування. Її бажано поєднувати з кривими MBЗ на опорних пунктах (на жаль, таких спостережень на території України всього чотири, і цього недостатньо для адекватного відображення глибинної будови окремих геолого-тектонічних одиниць). MTЗ і GMTЗ відображають інформацію про глибинний геологічний розріз, тоді як AMTЗ – про приповерхневий. Відсутність чи ігнорування даних про розподіл електропровідності у верхній частині розрізу веде до втрати інформації щодо глибинних неоднорідностей, оскільки неминуче погіршується надійність геоелектричних побудов при інтерпретації даних MTЗ та GMTЗ.

Бажання будувати якомога більш детальну верхню частину розрізу призводить до необхідності обробляти значні масиви польової інформації методом AMTЗ. Це, у свою чергу, призводить до необхідності формалізувати процес обробки та 1D-інверсії. Рішення відповідних задач із застосуванням саме 3D-моделювання експериментальних даних заповнює порожнечу, яка пов'язана з втратою інформації при формальній побудові синтетичного двовимірного або квазі-3D розрізу як узагальнених одновимірних.

Тому перспективний розвиток глибинної геоелектрики в Україні необхідно розглядати у зв'язку із застосуванням не тільки різних модифікацій ЕМ спостережень поля у широкому діапазоні періодів, але й удосконаленням синхронних площадних систем збору даних, які майже відсутні нині.

Результати проведених MT досліджень показали, що для побудови більш детальної локальних геоелектричних моделей, які відображають тектоніку і геодинаміку регіонів та можуть застосовуватись при пошуках рудопорояв корисних копалин, у тому числі вуглеводнів, необхідно провести не тільки додаткові експериментальні спостереження, але і більш детальні побудови моделей у масштабі 1:100000 на відміну від регіональних (масштабом 1:2500000 або 1:1000000), які маємо на сьогодні. Сучасні геоелектричні дослідження, проведені авторами в різних частинах ДДЗ, Карпатському регіоні та локальних ділянках УЩ, Переддобрудзького прогину, свідчать про необхідність продовження такої роботи.

Сьогодні проблема пошуків зкупчень природного водню та організації його видобутку є досить актуальною у зв'язку з наміром світової спільноти перейти у найближчій перспективі на безвуглецеву енергетику, в якій важливе місце приділяється водню – екологічно чистому паливу майбутнього. За результатами сейсмотомографії (Цветкова і др., 2017) присутність похилих шарів у мантії, а також поширення шару перехідної зони верхньої мантії від південних структур (з боку Чорного моря) на північ дозволяє стверджувати про активізацію мантії під Південноукраїнською монокліналою та південною окраїною УЩ. Зроблено висновок, що саме Північноазовський та Волино-Оршанський пліуми можуть бути основними джерелами водню. Ці території також можна вважати перспективними щодо подальших глибинних геоелектричних досліджень.

Окремим питанням постає дослідження ймовірної природи аномалій високої електропровідності в земній корі та верхній мантії, їх зв'язок з геодинамічними проявами та родовищами і рудопроявами корисних копалин, зокрема і горючих. Вирішення цієї задачі має значення при побудові глибинних геологічних і геотектонічних моделей, прогнозних металогенічних карт і схем, розробці критеріїв виділення перспективних площ на виявлення нових рудних та вуглеводневих проявів корисних копалин, а також для пояснення сучасних геодинамічних процесів.

Список використаних джерел

- Белявський, В.В., Бурахович, Т.К., Кулик С.Н., Сухой, В.В. (2001). Электромагнитные методы при изучении Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. К.: Знання.
- Бурахович, Т.К., Ганієв, О.З., Ширков, Б.І. (2015). Моделювання глибинної будови Голованівської шовної зони за даними геоелектрики. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(69), 52–59.
- Бурахович, Т.К., Николаев, И.Ю., Шеремет, Е.М., Ширков, Б.І. (2015). Геоэлектрические аномалии Украинского щита и их связь с рудопроявлениями полезных ископаемых. *Геофизический журнал*, 37(6), 42–63.
- Бурахович, Т.К., Ширков, Б.І. (2017). Электромагнитные методы при прогнозировании рудопроявлений в зоне эндоконтакта Корнинского гранитного массива. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(79), 40–45.
- Бурахович, Т.К., Кушнір, А.М., Ільєнко, В.А. (2021). Інтерпретація 3D геоелектричної моделі надр степового Криму. Єваторійський та Сакський профілі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(95), 34–38.
- Бурахович, Т.К., Кушнір, А.М., Ільєнко, В.А. (2022¹). Сучасні геоелектромагнітні дослідження Українських Карпат. *Геофизический журнал*, 44(3), 21–43.
- Бурахович, Т.К., Ільєнко, В.А., Кушнір, А.М. (2022²). Тривимірна геоелектрична модель центральної частини Звиздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофизический журнал*, 44(3), 13–33.
- Гордиенко, В.В. (2001) Современная активизация и изотопия гелия территории Украины. Киев: Знання.
- Ільєнко, В.А., Кушнір, А.М., Бурахович, Т.К. (2019). Электромагнитні дослідження Звиздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофизический журнал*, 42(4), 97–113.
- Ільєнко, В., Бурахович, Т.А., Кушнір, Попов, С., Омельчук, О. (2020). МТ/МВ дослідження в зоні эндоконтакта Корнинського гранітного масиву. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(88), 46–52.
- Кушнір, А.Н., Бурахович, Т.К. (2012). Аномалии электропроводности и внутриплитовые землетрясения западной части Украинского щита и Волинско-Подольской плиты. *Геофизический журнал*, 34(4), 157–165.
- Кушнір, А.М., Бурахович, Т.К., Ільєнко, В.А., Николаев, И.Ю., Ширков, Б.І. (2019) Глибинні геоелектричні дослідження Троянківського та Тарасівського метабазитових масивів Голованівської шовної зони. *Геофизический журнал*, 41(6), 56–72.
- Кушнір, А., Бурахович, Т., Ільєнко, В., Ширков, Б. (2021). Сучасні магнітоелектричні дослідження Українських Карпат. *JGD*, 2(31), 92–101.
- Кушнір, А.М., Бурахович, Т.К. (2021). Геоелектричні неоднорідності Кримського регіону як зони проявів сейсмічності та нафтогазоносності. *Геофизический журнал*, 43(1), 69–92.
- Кутас, Р.І. (2020). Геотектонические и геотермические условия зон флюидной и газовой разгрузки в Черном море. *Геофизический журнал*, 42(5). 16–52.
- Николаев, И.Ю., Бурахович, Т.К., Шеремет, Е.М. (2013). Объемная геоэлектрическая модель Кировоградского рудного района центральной части Украинского щита. *Геофизический журнал*, 35(4), 127–139.
- Николаев, И.Ю., Кушнір, А.М., Ільєнко, В.А., Николаев, Ю.І. (2019). Электромагнитні дослідження західної частини Українського щита. *Геофизический журнал*, 41(3), 120–133.
- Старостенко, В.І., Гинтов, О.Б. (Ред.). (2018). Очерки геодинамики Украины. Киев: ТОВ "ПІДПРИЄМСТВО «ВІН ЕН ЕЙ»".
- Старостенко, В.І., Бурахович, Т.К., Кушнір, А.Н., Легостаева, О.В., Цветкова, Т.А., Шеремет, Е.М., & Шумлянская, Л.А. (2013). Возможная природа сейсмической активности недр Добруджского прогиба и Северной Добруджи. *Геофизический журнал*, 35(1), 61–74.
- Цветкова, Т.А., Бугаєнко І.В., Заец Л.Н. (2017). Сейсмическая визуализация плюмов и сверхглубинных флюидов в мантии под территорией Украины. *Геофизический журнал*, 39(4), 42–54.
- Шеремет, Е.М., Бурахович, Т.К., Николаев, И.Ю., Дудик, А.М., Дудик, К.А., Кушнір, А.Н., Ширков, Б.І., Сетая, Л.Д., Агаркова, Н.Г. (2016). Геоэлектрические и геохимические исследования при прогнозировании углеводородов в Украине. Под ред. акад. НАН Украины А.Н. Пономаренко. Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. Н.П. Семенова НАН Украины. К.: ЦП "Компринт".
- Ширков, Б.І., Бурахович, Т.К., Кушнір, А.Н., Зайцев, Г.М. (2013). Аномальна електропровідність земної кори східної частини Приазовського мегаблока. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 60, 12–16.
- Шуман, В.Н., Савин, М.Г. (2011). Математические модели геоэлектрики. Киев: Наукова думка.
- Шуман, В.Н. (2012). Современные электромагнитные зондирующие системы: состояние, тенденции развития, новые идеи и задачи. *Геофизический журнал*, 34(4), 282–291.
- Burakhovich, T.K., Kushnir, A.N., Nikolaev, I.Yu., Shirkov, B.I. (2015). The 3D geoelectrical model of Earth crust and the upper mantle of the Dobrudzha region. *Геодинаміка*, 18(1), 55–62.
- Burakhovich, T.K., Kulik, S.N., Khazan, Ya.M. (2001). Electrical conductivity anomalies in the crust and upper mantle of Ukraine. *Acta Geoph. Polonica*, 50(4), 547–565.
- Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I., Tregubenko, V.I. (1999). Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth Planets Space*, 51, 1127–1133.
- Kushnir, A., Burakhovich, T., Iliencko, V., Shyrkov, B. (2021). Geoelectrical properties of earth's crust and upper mantle rocks according to the 1D inversion results of DMTS curves. *XXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*. May 2021, Kyiv. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521116>
- Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. (2008). Models and Methods of Magnetotellurics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Farfaliuk, L., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomyets, K., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophys. J. Int.*, 201, 406–428.

References

- Belyavskiy, V.V., Burakhovich, T.K., Kulik, S.N., Sukhoy, V.V. (2001). Electromagnetic methods in the study of the Ukrainian Shield and the Dnieper-Donets Basin. Kyiv: Znannya. [in Russian]
- Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. (2008). Models and Methods of Magnetotellurics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Burakhovich, T., Ganiev, O., Shirkov, B. (2015). Deep structure modeling of Golovanivsk suture zone on the basis of geoelectric data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(69), 52–59. [in Ukraine]
- Burakhovich, T., Kushnir, A., Iliencko, V. (2021). Interpretation of the 3D geoelectrical model of the steppe Crimea bowels. Eupatoria and Saki profiles. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(95), 34–38. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.04> [in Ukraine]
- Burakhovich, T.K., Iliencko, V.A., Kushnir, A.M., (2022²). Three-dimensional geoelectrical model of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskij zhurnal*, 44(3), 13–33. DOI: <https://doi.org/10.24028/gj.v44i3.272325> [in Ukraine]
- Burakhovich, T.K., Kulik, S.N., Khazan, Ya.M. (2001). Electrical conductivity anomalies in the crust and upper mantle of Ukraine. *Acta Geoph. Polonica*, 50(4), 547–565.
- Burakhovich, T.K., Kushnir, A.M., Iliencko, V.A. (2022¹). Modern geoelectromagnetic researches of the Ukrainian Carpathians. *Geofizicheskij zhurnal*, 44(3), 21–43. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i3.261966> [in Ukraine]
- Burakhovich, T.K., Nikolaev, I.Yu., Sheremet, E.M., Shirkov, B.I. (2015). Geoelectric anomalies of the Ukrainian shield and their relation to mineral occurrences. *Geofizicheskij zhurnal*, 37(6), 42–63. [in Russian]
- Burakhovich, T., Shyrkov, B. (2017). Electromagnetic methods for forecasting of mineral resources occurrences. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(79), 40–45. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.06> [in Ukraine]
- Burakhovich, T.K., Kushnir, A.N., Nikolaev, I.Yu., Shirkov, B.I. (2015). The 3D geoelectrical model of Earth crust and the upper mantle of the Dobrudzha region. *Geodynamics*, 18(1), 55–62.
- Gordienko, V.V. (2001) Modern activation and helium isotopy of the territory of Ukraine. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Iliencko, V., Burakhovich, T., Kushnir, A., Popov, S., Omelchuk, O. (2020). Magnetotelluric and magnetovariable researches in the endocontact area of Korнинский granite array. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(88), 46–52. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.07> [in Ukraine]
- Iliencko, V.A., Kushnir, A.M., Burakhovich, T.K. (2019). Electromagnetic investigations fault zone of Zvizdal-Zalyska and Brusilovska of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskij zhurnal*, 4 (42), 97–113. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v4i4.2019.177370> [in Ukraine]
- Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I., Tregubenko, V.I. (1999). Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth Planets Space*, 51, 1127–1133.
- Kushnir, A., Burakhovich, T., Iliencko, V., Shyrkov, B. (2021). Geoelectrical properties of earth's crust and upper mantle rocks according to the 1D inversion results of DMTS curves. *XXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*. May 2021, Kyiv. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521116>
- Kushnir, A., Burakhovich, T., Iliencko, V., & Shyrkov, B. (2021). Modern magnetotelluric researches of the Ukrainian Carpathians. *JGD*, 2(3), 92–101. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.092> [in Ukraine]
- Kushnir, A.M., Burakhovich, T.K. (2021). Geoelectrical inhomogeneities of the Crimean region as the seismicity and oil-gas potential zones. *Geofizicheskij zhurnal*, 43(1), 69–92. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225494> [in Ukraine]
- Kushnir, A.M., Burakhovich, T.K., Iliencko, V.A., Nikolaev, I.Yu., Sheremet, E.M. (2019). Deep geoelectric studies of the Trojanyk and Tarasivka metabasite massifs of the Golovaniv suture zone. *Geofizicheskij zhurnal*, 41(6), 56–72. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190066> [in Ukraine]
- Kushnir, A.N., Burakhovich, T.K. (2012). Electrical conductivity anomalies and intraplate earthquakes in the western part of the Ukrainian Shield and Volyn-Podolsk plate. *Geofizicheskij zhurnal*, 34(4), 157–165. [in Russian]
- Kutas, R.I. (2021). Geotectonic and geothermal conditions of the gas discharge zones in the Black Sea. *Geofizicheskij zhurnal*, 42(5). 16–52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215070> [in Russian]
- Nikolaev, I.Yu., Burakhovich, T.K., Sheremet, E.M., (2013). Obymnaya geoelektricheskaya model Kirovogradskogo rudnogo rayona tsentralnoy chasti Ukrainskogo schita. *Geofizicheskij zhurnal*, 35(4), 127–139. [in Russian].
- Nikolaev, I.Yu., Kushnir, A.M., Iliencko, V.A., Nikolaev, Yu.I. (2019). Electromagnetic studies of the western part of the Ukrainian shield.

Geofizicheskij zhurnal, 3 (41), 120–133. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172433> [in Ukraine]

Sheremet, E.M., Burakhovich, T.K., Dudik, A.M., Nikolaev, I.Yu., Dudik, S.A., Kushnir, A.N., Shirkov, B.I., Setaya, L.D., Agarkova, N.G. (2016). Geoelectric and geo-chemical studies in predicting hydrocarbons in Ukraine. Kiev: Komprint, 489 p. [in Russian]

Shirkov, B.I., Burakhovich, T.K., Kushnir, A.M., Zaitsev, G.M. (2013). Anomalous electrical conductivity of the earth's crust in the eastern part of the Azov megablock. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(60), 12–16. [in Ukraine]

Shuman, V.N. (2012). Modern electromagnetic probing systems: state of the art, development trends, new ideas and tasks. *Geofizicheskij zhurnal*, 34(4), 282–291. [in Russian]

Shuman, V.N., Savyn, M.G. (2011). Mathematical models of geoelectrics. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Farfaliak, L., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiets, K.,

Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., Tolgunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophys. J. Int.*, 201, 406–428. doi:10.1093/gji/ggv018

Starostenko, V.I., & Gintov, O.B. (Eds.). (2018). Essays on the geodynamics of Ukraine. Kiev. VI EN EY [in Russian]

Starostenko, V.I., Burakhovich, T.K., Kushnir, A.M., Legostaeva, O.V., Tsvetkova, T.O., Sheremet, E.M., Shumlyanskaya, L.A. (2013). The possible nature of the seismic activity of the depths of the Predobudruzhsy trough and the Northern Dobruja. *Geofizicheskij Zhurnal*, 35(1), 61–74. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i1.2013.116331> [in Russian]

Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., Zaets, L.N. (2017). Seismic visualization of plumes and super-deep fluids in mantle under Ukraine. *Geofizicheskij Zhurnal*, 39(4), 42–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.1075062017> [in Russian]

Надійшла до редколегії 21.12.22

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

E-mail: burakhovich@ukr.net;

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

E-mail: antonn@ukr.net;

Institute of Geophysics NAS of Ukraine,

32 Palladina Ave., Kiev, 03680, Ukraine

HISTORY, CURRENT STATE AND FUTURE PROSPECTS OF GEOELECTROMAGNETIC RESEARCH IN UKRAINE

The current state and prospects for the development of geoelectromagnetic methods are considered. Problems and ways to solve them, new ideas and new tasks are discussed. Modern experimental methods of observations, universal software complexes for their processing, methods of three-dimensional model building of various geological and tectonic units of Ukraine are analyzed. The geological and geophysical interpretation results of regional and local three-dimensional models are shown. Geoelectrical inhomogeneities in the earth's crust and upper mantle of Ukraine, which are characterized by abnormally low and abnormally high values of resistivity, have been revealed. Zones of high conductivity that reach the surface are defined by subvertical heterogeneity and form a galvanically connected system. It spatially correlates with deep faults of various ranks, identified by geological data. The nature of conductivity anomalies at the depth of up to 2.5 km is due to the presence of conductive mineral associations (sulfides, graphite) in the zones of metasomatic processing rocks that lead to the formation of ore mineralization (uranium, gold, rare metals). In the earth's crust at the depths of 5–30 km and the upper mantle of 50–120 km, most likely, traces of the influence of modern mantle fluids are reflected. More and more often, according to the latest data, the nature of anomalies is considered as the result of the joint activity of electronic and ionic conductivity. Conductivity anomalies of the earth's crust and upper mantle indicate possible zones of geodynamic activation, and deep faults are defined by zones of increased permeability through which mantle fluids are unloaded through the lithosphere. In particular, the connection of conductivity anomalies on the territory of Ukraine with the processes of petroleum and ore deposit formation is demonstrated.

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

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.08>

В. Ємець, асп.,

E-mail: vlad.yemets97@gmail.com;

І. Безродна, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: bezin3@ukr.net;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;

В. Антонюк,

E-mail: wklejvit@gmail.com,

АТ "Укргазвидобування", м. Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТІВ ЗАМІЩЕННЯ ФЛЮЇДУ У ВІЗЕЙСЬКИХ ВІДКЛАДАХ ЯБЛУНІВСЬКОГО РОДОВИЩА НА ОСНОВІ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДАНИХ ГДС ТА ПЕТРОФІЗИКИ

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

Висвітлено метод заміщення флюїду, який використовується для моделювання пружних властивостей порід-колекторів та їхньої залежності від пористості та типу флюїду, що заповнює пустотний простір. Така методика дозволяє прогнозувати зміни акустичних характеристик порід залежно від їх насичення пластовою водою, газом чи нафтою.

Основним завданням даної роботи було вивчення продуктивних зон візейських відкладів Яблунівського родовища на прикладі окремо взятої свердловини. Поєднання петрофізики та фізики гірських порід (Гасманівське заміщення флюїду) було застосовано для пісковиків з міжзерновим типом пористості.

Метою дослідження було застосування петрофізичних залежностей, крос-плотів і Гасманівського заміщення флюїду для визначення ефекту впливу пластового флюїду (вода, нафта, газ) на акустичні властивості (швидкості повздовжньої і поперечної хвиль) і густини порід-колекторів.

Було встановлено, що в основному колектори розглянутих відкладів представлені пісковиками. У результаті впровадження методики Гасмана визначено ефект впливу заміщення флюїду на пружні властивості. Для утворених моделей відмічено зменшення значень швидкості повздовжньої хвилі і густини для вимірних кривих, для швидкості поперечної хвилі – незначне збільшення по відношенню до моделі повністю насиченою пластовою водою. Для водо- і нафтогазонасичених товщ горизонтів В-20 – В-22 встановлено граничні значення показників акустичного імпедансу і параметра V_p/V_s , що можуть використовуватися в межах всього Яблунівського родовища при створенні пружних моделей порід-колекторів і аналізі інформації під час закладання нових свердловин.

Ключові слова: петрофізика, фізика гірських порід, геофізичні дослідження свердловин, Гасманівське заміщення флюїду, візейські відклади.

Постановка проблеми. На сьогодні вуглеводнева сировина й надалі продовжує бути основним джерелом енергії у світовій енергетиці. Саме тому розробляються та вдосконалюються різноманітні методи для розвідки, дорозвідки та збільшення її видобутку на нових і старих нафтогазових родовищах. Дослідження вуглеводневих покладів вимагає детального їх опису, який насамперед включає визначення типу і об'єму пластового флюїду, наявного в породі-колекторі.

На оцінку порід-колекторів за даними геофізичних досліджень свердловин (ГДС) зазвичай впливає велика кількість невизначеностей. Поєднання даних різних геофізичних методів і результатів досліджень керну дозволяє оцінити фізичні властивості гірських порід та зменшити неоднозначність інтерпретації даних ГДС. Як петрофізика (наука про фізичні властивості гірських порід), так і фізика гірських порід (у спеціальній термінології: наука, яка характеризує фізичні властивості гірських порід через їхні пружні параметри), загалом відіграють вирішальну роль в оцінці властивостей продуктивних товщ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Петрофізичні моделі, що застосовуються в інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин, дозволяють трансформувати свердловинні вимірювання у властивості породи та флюїду, в такі, як насиченість, глинистість та пористість (Ellis et al., 2007). Однією з цілей моделювання у фізиці гірських порід є визначення фізичних взаємозв'язків між властивостями породи та флюїду і спостережуваною поведінкою даних геофізичних методів, зокрема сейсморозвідки (Mavko et al., 2009).

Однією з найвідоміших моделей фізики гірських порід, що використовується для прогнозу зміни швидкостей поширення повздовжніх та поперечних хвиль у середовищах з різним характером насичення, є

Гасманівське заміщення флюїду (Purnamasari et al., 2014). Таки зміни виникають внаслідок того, що об'ємні пружні модулі дуже чутливі до будь-якого насичення.

Моделювання ефекту впливу мінеральної складової, пористості порід та вмісту в них флюїду на акустичні та пружні властивості порід розрізу в загальному базується на встановленні емпіричних зв'язків петрофізичних параметрів. На такому ж самому принципі було здійснено спроби застосування статистичної множинної регресії на основі каротажних кривих та зразків керну багатьма вченими (Wyllie et al., 1956; Raymer et al., 1980; Han et al., 1986; Eberhart-Phillips et al., 1989). Однак ці результати не мали значного успіху в моделюванні заміщення флюїду, оскільки не мали всебічного фізичного обґрунтування.

Формулювання цілей статті. Метою даного дослідження є моделювання ефектів впливу різних типів пластового флюїду (вода, нафта, газ) на зміну пружних параметрів та густини продуктивних порід візейських відкладів Яблунівського родовища на основі проведеної авторами інтерпретації даних ГДС. Моделювання ґрунтується на побудові петрофізичної моделі, а також поєднанні петрофізики і фізики гірських порід на прикладі математичних моделей Гасманівського заміщення флюїду в породах-колекторах. Така модель застосовується в оберненій задачі для оцінки об'ємних характеристик гірських порід за результатами геофізичних досліджень свердловин. Основна перевага запропонованого підходу полягає в забезпеченні більш точного опису порід-колекторів свердловини шляхом врахування пов'язаної моделі петрофізичних властивостей, що визначені за лабораторними дослідженнями та ГДС.

Основним завданням фізики гірських порід є отримання зв'язку між якісними геологічними параметрами та кількісними геофізичними вимірюваннями. Моделі фізики

© Ємець В., Безродна І., Антонюк В., 2023

гірських порід можна використовувати для визначення властивостей гірських порід і флюїдів на основі акустичних швидкостей і густини – як вирішення оберненої математичної задачі. Ця ключова для нафтогазової галузі технологія і була впроваджена в даному дослідженні.

Геологічні особливості об'єкта дослідження. У даній роботі наведено результати досліджень, що одержані під час геофізичного вивчення розрізу свердловини № 1 Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища. Порооди об'єкта досліджень належать до візейського ярусу карбону, у горизонтах В-20 – В-22 вони представлені чергуванням аргілітів, алевролітів і пісковиків, зустрічаються невеликі прошарки карбонатних

порід. Нафтогазоносність порід пов'язана з пісковиками та алевролітами.

Пісковики – різнозернисті, переважно грубо-крупнозернисті, з гравійною домішкою, колір їх світло-сірий з жовтим відтінком. Текстура пісковиків шарувата, коса (рис. 1), вона підкреслена прошарками, що збагачені вуглисто-слюдистим матеріалом, товщина прошарків до 1 мм. Також поширені нечисленні прошарки кам'яного вугілля, завтовшки до 2 мм, які підкреслюють текстуру. На зламах по нашаруванню – дрібні конкреції піриту (розміром до 2 мм) та дрібний вуглефікований рослинний детрит. Спостерігаються численні тріщини, розвинуті по поверхнях нашарування (Святенко та ін., 2019).

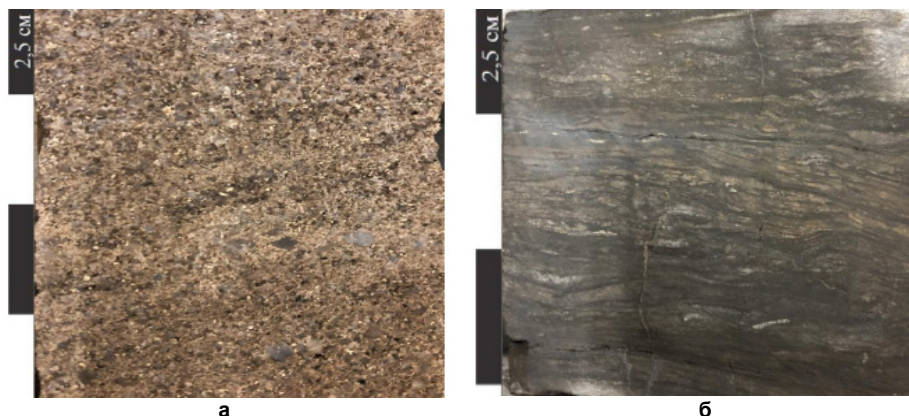


Рис. 1. Грубо-крупнозернистий пісковик з гравійною домішкою з косо-шаруватою текстурою (а); хвилясто-шарувата текстура в перешаруванні алевроліту та аргіліту, яка характерна для припливно-відпливної зони (б)

Текстура алевролітів шарувата, хвилясто-шарувата з елементами лінзоподібної, підкреслена зміною літологічного складу. Поширені прошарки, збагачені дрібними конкреціями піриту (розмір до 3 мм). В алевролітах поширені текстури деформацій та текстури потоків. На зламах по нашаруванню поширений вуглефікований детрит. Спостерігається нечисленний детрит мушель брахіопод. У зразках порід загалом відслідковуються численні тріщини, що розвинуті по поверхнях нашарування, а також численні звивисті розгалужені тріщини, заповнені білим карбонатним матеріалом (товщина до 4 мм) (Святенко та ін., 2019).

Аргіліти темно-сірі, алевроитові. Текстура шарувата, горизонтальна. По пластах поширені численні конкреції піриту, що мають лінзоподібну форму з округлою серединою та лінзоподібним ореолом. Розмір конкрецій – до 2×4 см. Спостерігаються тріщини, розвинуті по поверхнях нашарування порід (Святенко та ін., 2019).

Карбонатні породи представлені мергелями, глинистими вапняками з чорно-сірими аргілітами (товщина прошарків, яких становить до 2 см). Колір органічних уламків світло-сірий та білий. Текстура шарувата. Структура карбонатних прошарків органогенно-уламкова. Уламки складені детритом мушель брахіопод. Також по пластах спостерігаються прошарки, збагачені скупченням конкрецій піриту, які поширені по поверхнях нашарування. До низу шару кількість органічного детриту поступово зменшується, та набувають поширення хвилясто-шарувата та лінзоподібна текстури. По породах спостерігаються численні звивисті розгалужені тріщини, заповнені білим карбонатним матеріалом завтовшки до 4 мм (Святенко та ін., 2019).

За даними (Святенко та ін., 2019), товщини пластів-колекторів змінюються по розрізах свердловин Яблунівського родовища від 0,5 до 30 м.

Коефіцієнт пористості (K_p) у породах визначено (Святенко та ін., 2019):

- за даними ГДС – від 8,1 до 30,0 %,
- за даними лабораторних досліджень керну – від 11,88 до 25,4 % (найчастіше зустрічається K_p у діапазоні: 18,0÷20,0 %).

Методичні прийоми. Основним завданням петрофізичної інтерпретації даних ГДС є виділення потенційних вуглеводневих товщ та оцінка їхніх якісних і кількісних характеристик. Для цього зазвичай вирішуються такі завдання:

- розчленування розрізу свердловини на пласти і прошарки;
- визначення за каротажними даними фізичних параметрів порід;
- оцінка насиченості розрізу;
- виділення порід-колекторів;
- визначення колекторських властивостей пластів (коефіцієнти глинистості, пористості та нафтогазонасиченості);
- визначення типу порід-колекторів у перспективних і продуктивних інтервалах розрізу;
- оцінка експлуатаційних характеристик продуктивних пластів.

При інтерпретації даних ГДС свердловини № 1 Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища для оцінки характеру насичення в продуктивних зонах було використано загальновідоме рівняння Арчі для осадових порід, яке залежить від точності обрахованої пористості та опору пластової води, і виражається як:

$$S_w = \sqrt{\frac{a R_w}{\phi^m R_t}}, \quad (1)$$

де S_w – коефіцієнт водонасичення; a – емпіричний коефіцієнт, який залежить від структури пустотного

простору, глинистості та гідрофільності породи; R_w – опір пластової води; R_t – опір пласта; m – коефіцієнт цементації; ϕ – коефіцієнт пористості.

Для кращої характеристики породи-колектора важливо розуміти тип насичуючого флюїду. Для оцінки типу пустотного наповнювача порід будують кореляційні залежності та крос-плоти даних каротажу та результатів лабораторних вимірювань керну.

Швидкість поширення повздовжньої хвилі (V_p), швидкість поширення поперечної хвилі (V_s) і густина (ρ) порід є основними параметрами, які контролюють пружну поведінку вуглеводневих товщ, тому доречним є побудова крос-плотів, що досліджують взаємозв'язки параметрів: V_p та густини; V_p і V_s ; пористості і V_p ; пористості і V_s ; пористості і акустичного імпедансу ($V_p \cdot \rho$).

У фізиці гірських порід вивчається поняття заміщення флюїду, яке характеризується рівнянням Гасмана. Тут описаний зв'язок між об'ємними та зсувними пружними модулями флюїдонасичених товщ і товщ, повністю позбавлених впливу флюїду (Mavko et al., 2009). Рівняння Гасманівського заміщення флюїду дає можливість змодельовувати зміни пружних властивостей (акустичний імпеданс) продуктивних порід залежно від рівня насичення газом, нафтою чи водою (Han, 2004).

Для дослідження ефекту впливу насичення порід флюїдом на швидкість пружних хвиль і густину порід згідно з концепцією Гасмана використовується в декілька етапів така методика.

На першому етапі оцінюються об'ємні (K_{sat}) і зсувні (μ_{sat}) модулі в початкових умовах формування порід-колекторів для кожної точки каротажної кривої:

$$K_{sat} = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2), \quad (2)$$

$$\mu_{sat} = \rho V_s^2, \quad (3)$$

де V_p – швидкість поширення повздовжньої хвилі; V_s – швидкість поширення поперечної хвилі; ρ – густина.

Дуже часто дані швидкості поширення поперечної хвилі є недоступними. Тому для математичного моделювання V_s може бути використано рівняння Грінберга–Кастанья з коефіцієнтами, що підібрані для даного регіону та відкладів, або регресійний аналіз з використанням даних швидкості поширення повздовжньої хвилі, вмісту водню та питомого опору порід (Ємець та Безродна, 2022; Безродна та Антонюк, 2018).

У даній роботі автори використали матеріали, що були безпосередньо виміряні у польових умовах під час геофізичних досліджень свердловин та в петрофізичній лабораторії (Святенко та ін., 2019).

Другий етап передбачає застосування інверсії Гасмана для того, щоб привести продуктивні товщі до умов, повністю позбавлених насичення флюїдом, для підрахунку так званих сухих об'ємних пружних модулів (K_{dry}), використовуючи рівняння (Zhu and McMechan, 1990):

$$K_{dry} = \frac{K_{sat} \left(\frac{\phi K_{mat}}{K_{fl}} + 1 - \phi \right) - K_{mat}}{\frac{\phi K_{mat}}{K_{fl}} + \frac{K_{sat}}{K_{mat}} - 1 - \phi}, \quad (4)$$

де K_{mat} – об'ємний модуль мінеральної матриці; K_{fl} – об'ємний модуль флюїду і ϕ – коефіцієнт пористості. Об'ємні модулі (K_{fl}) і густина флюїду (ρ_{fl}) вираховані, використовуючи такі взаємозв'язки (Wood, 1955):

$$\frac{1}{K_{fl}} = \frac{S_w}{K_{brine}} + \frac{S_H}{K_{hyc}}, \quad (5)$$

$$\rho_{fl} = S_w \rho_{brine} + S_H \rho_{hyc}, \quad (6)$$

де S_w – коефіцієнт водонасичення; $S_H = (1 - S_w)$ – коефіцієнт нафтогазонасичення; K_{brine} та K_{hyc} – об'ємні модулі

пластової води і вуглеводнів відповідно; K_{brine} , K_{hyc} , ρ_{brine} і ρ_{hyc} розраховуються із залежностей, запропонованих Батцелом і Венгом (Batze and Wang, 1992).

На третьому етапі використовується згадане раніше рівняння Гасмана, в якому оцінюються різні рівні насичення флюїдом порід продуктивних пластів. Для кожного типу насичення (заміщення флюїду) розраховуються параметри K_{sat} , ρ_{sat} і μ_{sat} . Рівняння Гасмана набуває вигляд (Kumar, 2006):

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{(1 - \frac{K_{dry}}{K_{mat}})^2}{[\frac{\phi}{K_{fl}} + \frac{(1 - \phi)}{K_{mat}} - \frac{K_{dry}}{K_{mat}^2}]}, \quad (7)$$

і

$$\mu_{sat} = \mu_{dry}. \quad (8)$$

Рівняння (8) визначає такі умови, де зсувні модулі (μ_{dry}) є незалежними від наявності флюїду в поріді. Густина породи після заміщення флюїду може бути розрахована як (Kumar, 2006):

$$\rho_{sat} = \phi \rho_{fl} + (1 - \phi) \rho_{mat}. \quad (9)$$

Для підрахунку V_p і V_s після заміщення флюїду використовуються такі рівняння (Kumar, 2006):

$$V_{p_sat} = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu_{sat}}{\rho_{sat}}}, \quad (10)$$

$$V_{s_sat} = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_{sat}}}. \quad (11)$$

Рівняння 9–11 можуть використовуватися для підрахунку V_p , V_s і густини (ρ) для кожного типу насичення після заміщення флюїду.

На четвертому етапі отримані результати порівнюються між собою і визначається вплив флюїду на пружні швидкості та густину порід.

Результати досліджень. Після проведення стандартної інтерпретації даних ГДС візейських відкладів Яблунівського родовища свердловини № 1 (в інтервалі дослідження 3790–4710 м), авторами за результатами петрофізичного аналізу кривих геофізичних досліджень була кількісно оцінена наявність імовірних перспективних зон порід-колекторів нафти й газу. На основі матеріалів ГДС та результатів лабораторних вимірювань керну було виділено низку пластів для оцінки промислової продуктивності порід-колекторів (нафтогазонасичені пісковики з пористістю 9÷16 %) (табл. 1). Для дослідженого розрізу перспективними в нафтогазовому відношенні виявилися шість інтервалів чотирьох розглянутих горизонтів. Потужність таких відкладів коливалася в межах 0.61÷3.55 м, що свідчить про наявні тонкошаруваті товщі, які є складними з погляду петрофізичної інтерпретації, а отже, надійне визначення їхніх фізичних властивостей є теж доволі складним процесом.

Оскільки акцент даної роботи був поставлений на пружні характеристики гірських порід, тому важливо було проаналізувати, які акустичні властивості вони мають. На рис. 2 для порід з різним літологічним складом зображено графік залежності V_p/V_s від інтервального часу проходження повздовжньої хвилі (DT). На графіку відображено декілька груп порід з різними швидкісними параметрами. Переважним типом у розглянутому інтервалі є високошвидкісні товщі.

Гасманівське заміщення флюїду, використовуючи представлену вище методологію, було застосовано для всього розрізу візейських відкладів свердловини № 1 Яблунівського родовища.

Таблиця 1

Номер пласта	Горизонт	Потужність пласта, м	Кгл, %	Кп, %	Кнг, %	Літологія
1	B-14	0.61	30	11	60	пісковик глин.
2	B-17	1.52	11	14	72	пісковик
3	B-18	1.98	9	12	92	пісковик
4	B-18	1.52	5	16	78	пісковик
5	B-22	1.22	10	9	87	пісковик
6	B-22	3.35	16	10	68	пісковик

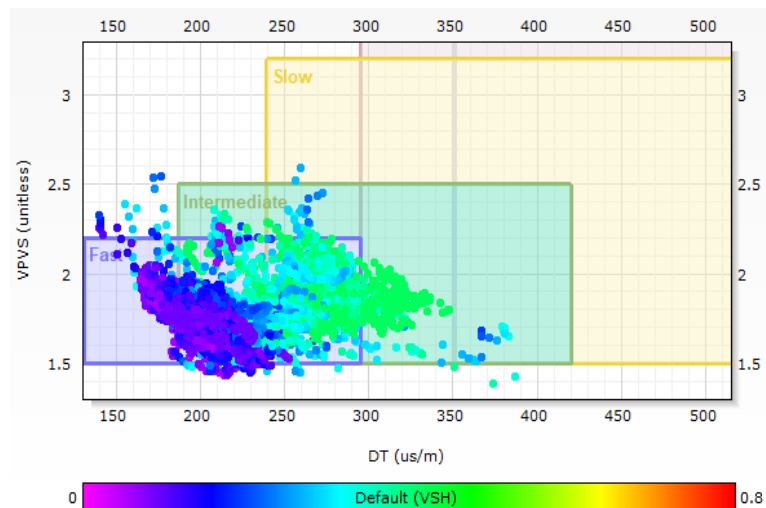


Рис. 2. Залежність V_p/V_s від інтервального часу проходження хвиль (за ГДС) для порід з різним літологічним складом

На рис. 3 для прикладу продемонстровано інтервал горизонту B-22, де відображено змодельовані криві швидкості проходження повздожньої і поперечної хвилі та густини за повного насичення водою.

У табл. 2 наведено результати Гасманівського заміщення флюїду для виділених за петрофізичною інтерпретацією шести пластів порід-колекторів, де спостерігаються певні відмінності між вимірними і змодельованими даними для кривих густини і повздожньої швидкості.

Варто відзначити, що після виконання моделювання Гасманівського заміщення флюїдів у газонасичених пластах збільшуються покази V_p та ρ , у випадку V_p різниця становить $0,01 \div 0,1$ км/с, а в ρ – $0,03 \div 0,11$ г/см³. Наведена

різниця в змодельованих значеннях V_p та ρ у водо- та газонасичених інтервалах відповідає теоретичним відомостям та демонструє вплив флюїду на пружні властивості.

На рис. 4 відтворено крос-плот залежності акустичного імпедансу (A/I) від відношення V_p/V_s , де вдалося встановити, що домінує тип колектору пісковик. Відобразивши поточково на цьому ж графіку залежності водо- та нафтогазонасичені товщі, визначені за результатами петрофізичної інтерпретації, чітко відмічається, що характер насичення продуктивних товщ значно впливає на їхні акустичні властивості.

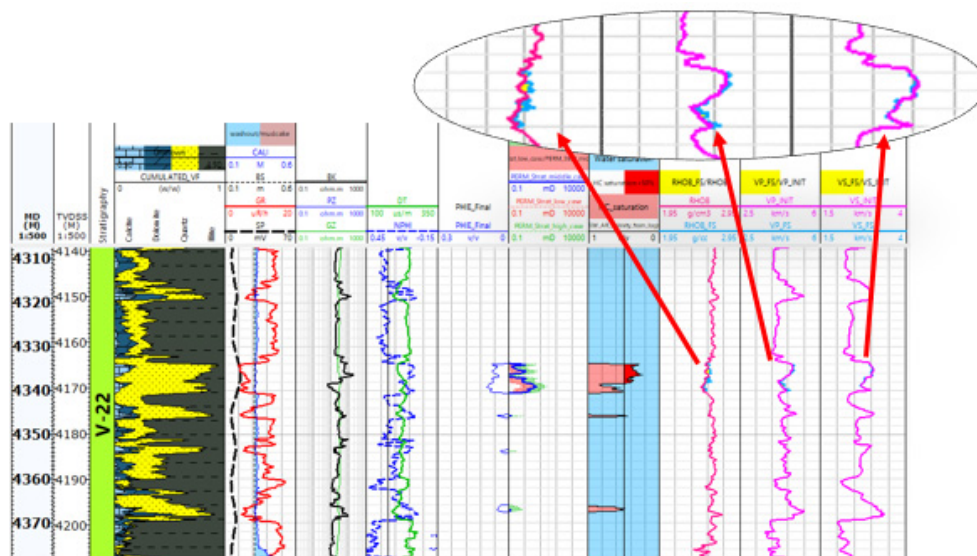
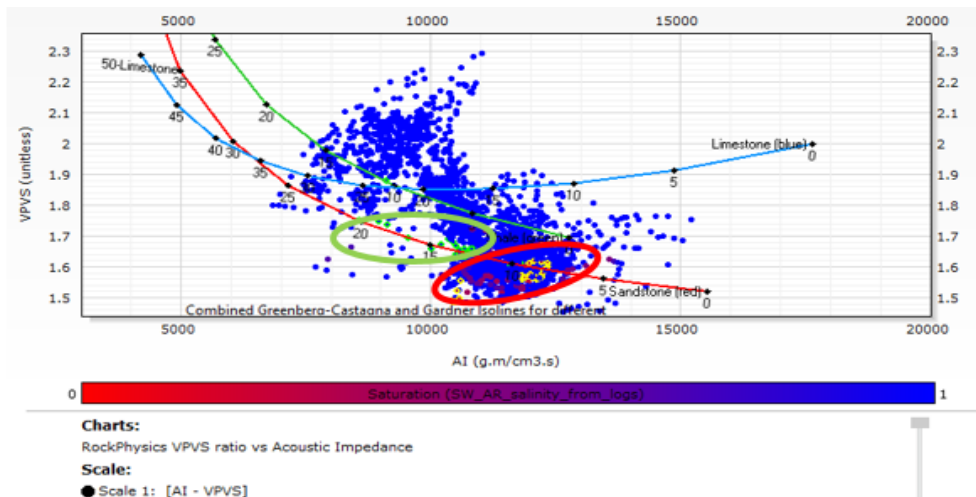


Рис. 3. Планшет з винесеними каротажними кривими стандартного комплексу, розрахованими петрофізичними властивостями, а також кривими V_p , V_s та об'ємної густини в початкових умовах дослідження (рожевий колір) та в умовах насичення водою (блакитний колір) (горизонт B-22)

Таблиця 2

Результати Гасманівського заміщення флюїду

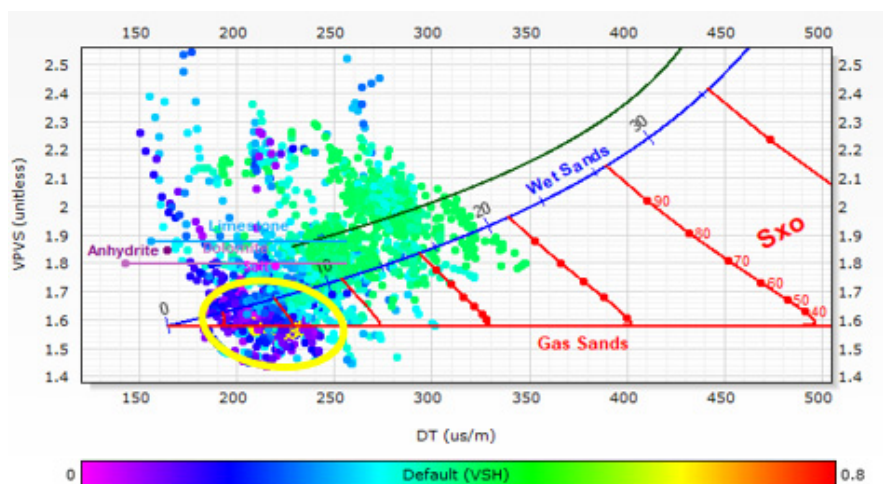
Номер пласта	Vp (до заміщення), км/с	Vs (до заміщення), км/с	ρ (до заміщення), г/см ³	Vp (після заміщення), км/с	Vs (після заміщення), км/с	ρ (після заміщення), г/см ³
1	4.61	2.67	2.54	4.62	2.65	2.55
2	4.52	2.96	2.46	4.61	2.93	2.51
3	4.67	2.79	2.43	4.68	2.73	2.54
4	4.74	2.09	2.46	4.76	2.07	2.5
5	4.78	3.02	2.54	4.88	2.98	2.59
6	4.5	2.94	2.51	4.65	2.92	2.54

Рис. 4. Крос-плот залежності акустичного імпедансу від залежності V_p/V_s для горизонтів В-20 – В-22 свердловини № 1 Яблунівського родовища

Для горизонтів В-20 – В-22 (рис. 4) граничні параметри коливаються в межах:

- для нафтогазонасичених (виділено червоним кольором)
AI: 10500÷12500 г·м/см³·с, V_p/V_s : 1,45÷1,60,
- для водонасичених (виділено зеленим кольором)
AI: 10500÷12500 г·м/см³·с, V_p/V_s : 1,55÷1,70.

На рис. 5 відображено графік залежності V_p/V_s від інтервального часу (DT) для різних типів порід, включаючи змішану літологію. За даними петрофізичної інтерпретації авторів, у дослідженнях матеріалів, де спостерігався ефект заміщення флюїду, продуктивні товщі розташовані у нижньому лівому куті, що відповідає газонасиченим пісковицям (виділено жовтим кольором).

Рис. 5. Перевірка якості відношення V_p/V_s та визначення впливу типу флюїду

Побудова такого графіку залежності є досить корисним прийомом для додаткового розмежування порід за літологічними групами та їхніми колекторськими властивостями. Навіть незначна кількість газу в пустотах може спричинити різке зменшення інтервального часу (DT), підтверджуючи те, що повздовжні хвилі є чутливими до змін флюїду в пустотному просторі.

Висновки. У даній роботі на прикладі візейських відкладів Яблунівського родовища було інтегровано петрофізичні дослідження з фізикою гірських порід. Здійснено петрофізичну інтерпретацію даних ГДС візейських відкладів порід. Встановлено, що переважним типом колектора є пісковики. У результаті впровадження методики Гасмана автори в дослідженому інтервалі довели ефект

впливу заміщення флюїду на пружні властивості продуктивних товщ порід. При проведенні контролю якості виконаних досліджень для продуктивних товщ для утворених моделей відмічено зменшення значень V_p ($1\pm 4\%$) і ρ для вимірених кривих ($1\pm 5\%$), для V_s – незначне збільшення щодо моделі повністю насиченою пластовою водою ($1\pm 3\%$). Таке розходження значень параметрів дає можливість під час застосування цієї методики виділяти перспективні товщі порід-колекторів на інших об'єктах.

Використовуючи графіки залежностей, для продуктивних горизонтів В-20 – В-22 було встановлено граничні значення показників акустичного імпедансу (AI) і відношення швидкостей пружних хвиль V_p/V_s для водо- і нафтогазонасичених товщ. Ці значення можуть бути використані в межах усього Яблунівського родовища при створення нових свердловин.

Список використаних джерел

Безродна, І., Антонюк, В. (2018). Оцінка колекторських властивостей теригених порід московського ярусу Західношебелинської площі на основі даних петрофізики. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2 (81), 34–38.

Смець, В., Безродна, І. (2022). Прогноз швидкості поперечної хвилі за даними геофізичних досліджень свердловин (на прикладі Яблунівського родовища Дніпровсько-Донецької западини). *Збірник матеріалів IX Всеукраїнської молодіжної наукової конференції "Ідеї та новації в системі наук про Землю"*.

Святенко, Г. та ін. (2019). Геолого-економічна оцінка запасів вуглеводнів Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища Полтавської області України. *Зем.*

Batzle, M.L., Wang, Z. (1992). Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, 64, 1396–1408.

Eberhart-Phillips, D., Han, D.-H., Zoback, M.D. (1989). Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone. *Geophysics*, 54, 82–89.

Ellis, D.A. et al. (2007). *Well Logging for Earth Scientists*. Springer.

Han, D.H., Batzle, M.L. (2004). Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities. *Geophysics*, 69, 398–405.

Han, D.H., Nur, A., Morgan, D. (1986). Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 51, 2093–2107.

Kumar, D. (2006). A tutorial on Gassmann fluid substitution: formulation, algorithm and Matlab code. *Geohorizons*, pp. 4–12.

Mavko, G.; Mukerji, T.; Dvorkin, J. (2009). *The Rock Physics Handbook, Tools for Seismic Analysis in Porous Media*. Cambridge University Press, Cambridge.

Purnamasari, I.A., Khairy, H., Abdeldayem, A.L., Ismail, W. (2014). Rock physics modeling and fluid substitution studies in sandstone reservoir. *J Appl Sci.*, 14, 1180–1185.

V. Yemets, PhD Student,

E-mail: vlad.yemets97@gmail.com;

I. Bezrodna, PhD (Geol.), Associate Prof.,

E-mail: bezin3@ukr.net;

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

V. Antoniuk,

E-mail: wklejvit@gmail.com,

JSC UkrGasVydobuvannya, Kyiv, Ukraine

Raymer, L.L., Hunt, E.R., Gardner, J.S. (1980). An improved sonic transit time-to-porosity transform. *Trans. Soc. Prof. Well Log Analysts 21st Ann. Logging Symp.*

Wyllie, M.R.J., Gergory, A.R., Gardner, L.W. (1956). Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 23, 41–70

Wood, A.W. (1955). *A Textbook of Sound*. The Macmillan Co., New York.

Zhu, X., McMechan, G.A. (1990). Direct estimation of the bulk modulus of the frame in fluid saturated elastic medium by Biot theory. *Expanded Abstract of 60th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysics*, 787–790.

References

Batzle, M.L., Wang, Z. (1992). Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, 64, 1396–1408.

Bezrodna, I., Antoniuk, V. (2018). Estimation of moskovan stage West-Shebelynska area clastic sedimentary rock reservoir properties using laboratory petrophysical data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2, 34–38. [In Ukrainian]

Eberhart-Phillips, D., Han, D.-H., Zoback, M.D. (1989). Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone. *Geophysics*, 54, 82–89.

Ellis, D.A. et al. (2007). *Well Logging for Earth Scientists*. Springer.

Han, D.H., Batzle, M.L. (2004). Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities. *Geophysics*, 69, 398–405.

Han, D.H., Nur, A., Morgan, D. (1986). Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 51, 2093–2107.

Kumar, D. (2006). A tutorial on Gassmann fluid substitution: formulation, algorithm and Matlab code. *Geohorizons*, pp. 4–12.

Mavko, G.; Mukerji, T.; Dvorkin, J. (2009). *The Rock Physics Handbook, Tools for Seismic Analysis in Porous Media*. Cambridge University Press, Cambridge.

Purnamasari, I.A., Khairy, H., Abdeldayem, A.L., Ismail, W. (2014). Rock physics modeling and fluid substitution studies in sandstone reservoir. *J Appl Sci.*, 14, 1180–1185.

Raymer, L.L., Hunt, E.R., Gardner, J.S. (1980). An improved sonic transit time-to-porosity transform. *Trans. Soc. Prof. Well Log Analysts 21st Ann. Logging Symp.*

Svyatenko S. et al. (2019). Geological and economic assessment of hydrocarbon reserves of the Yablunivske oil and gas complex of the Poltava region of Ukraine. *Report*. [In Ukrainian]

Wood, A.W. (1955). *A Textbook of Sound*. The Macmillan Co., New York.

Wyllie, M.R.J., Gergory, A.R., Gardner, L.W. (1956). Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 23, 41–70

Yemets, V., Bezrodna, I. (2022). Shear wave velocity estimation based on well logging data (with application to Yablunivske field, Dnipro-Donetsk depression). *Proceedings of the IX Ukrainian young scientific conference "Ideas and innovation in Geosciences"*. [In Ukrainian]

Zhu, X., McMechan, G.A. (1990). Direct estimation of the bulk modulus of the frame in fluid saturated elastic medium by Biot theory. *Expanded Abstract of 60th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysics*, 787–790.

Надійшла до редколегії 11.09.22

MODELLING OF THE EFFECTS OF FLUID SUBSTITUTION IN THE VISEAN DEPOSITS OF THE YABLUNIVSKE FIELD BASED ON THE INTERPRETATION OF WELL LOGGING DATA AND PETROPHYSICS

The paper discusses the details of the application of the method of fluid substitution which is used for predicting elastic properties of reservoir rocks and their dependence on pore fluid and porosity. This method makes it possible to predict changes in elastic response of a rock saturation with different fluids.

The main task of this paper was to study the productive zones of the visean deposits of the Yablunivske field using the example of a single well. The integration of petrophysics and rock physics (Gassmann fluid substitution) was applied to sandstones with intergranular porosity.

The objective of the study was to use petrophysical dependences, cross-plots and Gassmann fluid substitution modelling to determine the effect of different pore fluids (brine, oil, gas) on acoustic properties (compressional velocity, shear velocity, density).

It was established that the sandstone is a predominant type of reservoir of the considered rocks. The effect of fluid substitution on elastic properties was determined as a result of the implementation of Gasman's technique. The compressional velocity and density decreased, shear velocity slightly increased when brine was substituted with gas for the formed models. Limit values of acoustic impedance and V_p/V_s have been established for the water saturated and hydrocarbon saturated strata of the V-20 – V-22 horizons. It can be used for the drilling new wells of the Yablunivske field creating elastic reservoir rock models.

Keywords: petrophysics, rock physics, well logging, Gassmann fluid substitution, visean deposits.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553 (477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.09>

В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: vladvam@gmail.com,Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна**ВИСОКОПЕРСПЕКТИВНІ ОБ'ЄКТИ МІНЕРАЛЬНО-СИРОВИННОЇ БАЗИ УКРАЇНИ.
ЧАСТИНА 1. МЕТАЛІЧНІ КОРИСНІ КОПАЛИНИ***(Представлено членом редколегії д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)*

Наведено стислий опис високоперспективних об'єктів мінерально-сировинної бази металічних корисних копалин України, до яких віднесено такі родовища і прояви: комплексне карбонатитове рідкіснометалічно-апатитове Новопопелівське родовище (РЗЕ, Nb, Ta, P₂O₅); комплексне цирконій-рідкісноземельно-ніобієве Мазурівське (Октябрське) родовище (РЗЕ, Zr, Nb); комплексне рідкісноземельно-цирконієве Азовське родовище (РЗЕ, Zr); рідкісноземельне Анадольське родовище (РЗЕ); рідкісноземельні рудопояси Петрово-Гнупівський (РЗЕ) і Балка Корабельна (РЗЕ); розсіпні комплексні ільменіт-цирконієві родовища Малишевське (Ti, Zr) і Тарасівське (Ti, Zr); корінне комплексне рідкісноземельно-цирконієве Яструбецьке родовище (РЗЕ, Zr); Шевченківське родовище сподуменових руд (Li); Полохівське родовище петалітових руд (Li); Станкуватське родовище сподумен-петалітових руд (Li); прояв Крута Балка (Li); Жовторіченське комплексне залізо-уран-ванадій-скандієве родовище (Sc, Fe, U, V); вугілля Донецького басейну (Ge). Ці родовища серед металічних корисних копалин України мають найвищий рівень інвестиційної привабливості, найнижчі ризики інвестиційних вкладень, характеризуються середнім рівнем конкуренції і можуть бути рекомендовані як першочергові об'єкти для інвестування в їх вивчення і промислове освоєння. Для визначення перспектив інвестування конкретних об'єктів необхідна попередня геолого-економічна оцінка доцільності та рентабельності їх промислового освоєння.

Ключові слова: мінерально-сировинна база, родовище, стратегічні корисні копалини, інвестиційна привабливість.

Постановка проблеми. Одним з інструментів повного відновлення України є залучення інвестицій у розробку об'єктів її мінерально-сировинної бази (МСБ), для чого треба провести оцінку їх інвестиційної привабливості та оцінити ризик капіталовкладень в їх вивчення і освоєння. Насамперед, інтерес становлять стратегічні та критичні види корисних копалин (*Мировой рынок...*, 2020; *Мировые запасы...*, 2019; *Mineral Commodity...*, 2021; *Rare Earth...*, 2020; *World Mining...*, 2021).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням характеристики МСБ України присвячена значна кількість робіт, де охарактеризована структура МСБ України й описані найважливіші види стратегічних і критичних видів корисних копалин (*Гурський та ін.*, 2006; *Гурський, 2008; Інвестиційний атлас...*, 2021; *Михайлов та ін.*, 2007; *Мінеральні ресурси...*, 2020; *Рудько, Бала, 2021; Mykhailov et al.*, 2022).

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. В попередній статті (*Михайлов та ін.*, 2022) проведено системний аналіз МСБ стратегічних корисних копалин України і виділено чотири групи об'єктів щодо їх інвестиційної привабливості (традиційні, високоперспективні, перспективні і з нез'ясованими перспективами), але відсутній опис конкретних об'єктів, які можуть становити першочерговий інтерес для потенційних інвесторів.

Формулювання цілей статті. Основною метою статті є стисла характеристика високоперспективних об'єктів МСБ металічних корисних копалин України для встановлення їх інвестиційної привабливості, що може бути корисним для потенційних інвесторів.

Викладення основного матеріалу. До високоперспективних видів металічних корисних копалин в Україні віднесено рідкісні землі, цирконій, літій, скандій, германій (рис. 1). Наведено стислу характеристику найперспективніших родовищ цих елементів з погляду інвестиційної привабливості.

Рідкісні землі. Україна є найбільшою рідкісноземельною металогенічною провінцією Європи, має значні ресурси РЗЕ. Тут відомі родовища як традиційних типів, пов'язані з карбонатитами (Новопопелівське) та

маріуполітами (Мазурівське), так і нетрадиційних: багаті цирконієві та рідкісноземельно-цирконієві руди безнефелінових сієнітів (Азовське, Анадольське, Яструбецьке), багаті церієві руди (Петрово-Гнупівський прояв), польовошпатові метасоматити (прояв Балка Корабельна); кори вивітрювання (Хашуватське); монацитовмісні розсіпи Волино-Подільського і Приазовського районів Українського щита (УЩ). Цей вид сировини є стратегічно важливим для економіки нашої країни, хоча її родовища поки не розроблюються (*Гурський, 2008; Михайлов, 2010*).

З них спеціальні дозволи (ліцензії) на розвідку та видобуток мають на Яструбецькому родовищі (ділянка Яструбецька) ТОВ "ЦФР Груп", а на Анадольському полі в Приазов'ї – ТОВ "РМ Майнінгс"; пропозиції для ліцензування відкриті для Азовського родовища (ділянки), Стародубівського та Діанівського проявів у Донецькій області, Гурівського прояву у Дніпропетровській області. Загальні запаси рідкісноземельних руд в Україні оцінюються в 2,6 млрд т, запаси TR₂O₃ – 2,2 млн т, а ресурси TR₂O₃ – 3,4 млн т (*Мінеральні ресурси...*, 2020).

Україна має свої переваги щодо розвитку мінерально-сировинної бази РЗЕ, які пов'язані з наявністю комплексних родовищ і рудопоясів, але їх промислове освоєння й довивчення потребує значних інвестицій. Позитивним фактором для наших об'єктів є розвинута інфраструктура видобувної промисловості майже в усіх регіонах та близькість до ринку європейських споживачів.

Вивченням рідкісноземельної мінералізації в Україні займалися численні колективи як виробничників (ДРГП "Північгеологія", КП "Південьукргеологія", КП "Кіровгеологія", Схід ДРГП), так і науковців (ІГМР НАН України, ІГН НАН України, КНУ імені Тараса Шевченка та ін.) (*Гурський та ін.*, 2006; *Загнітко та ін.*, 2017; *Михайлов та ін.*, 2007, 2021; *Мінеральні ресурси...*, 2020; *Melnikov et al.*, 2000 та ін.).

Станом на 01.01.2019 р. у Державному балансі обліковувались запаси трьох родовищ: Новопопелівського, Азовського та Яструбецького. Всі вони комплексні. У 2019 р. поставлені на баланс попередньо розвідані запаси Анадольського родовища, для якого було надано спеціальний дозвіл на видобування.

Михайлов В., 2023

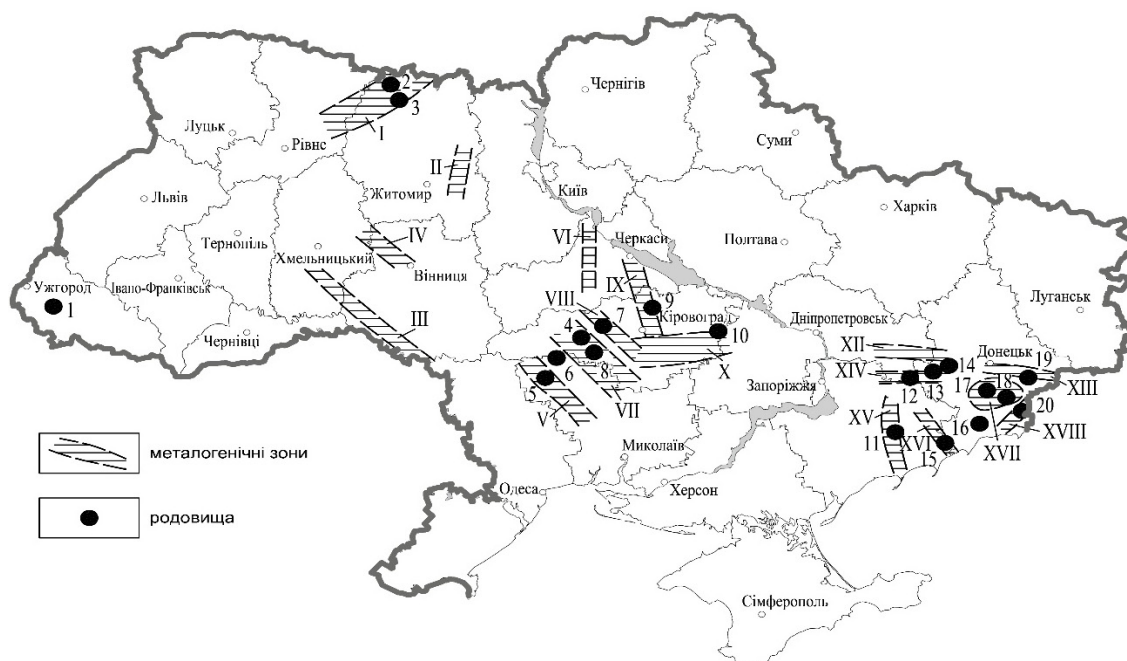


Рис. 1. Схема розташування рідкіснометалічних і рідкісноземельних родовищ України (Михайлов та ін., 2007):

Металогенічні зони: I – Сущано-Пержанська; II – Кочерівська; III – Подільська; IV – Хмельницька; V – Голованівська; VI – Звенигородська; VII – Липнязька; VIII – Хмельська; IX – Кіровоградська; X – Новоукраїнська; XI – Північнотерсянська; XII – Федорівська; XIII – Південнодонбаська; XIV – Гайчурська; XV – Чернігівська; XVI – Сорокинська; XVII – Октябрська; XVIII – Кальміуська. **Родовища:** 1 – Малобіганське (Ge); 2 – Яструбецьке (PЗЕ, Zr); 3 – Пержанське (Be); 4 – Станкуватське (Li, Ta, Nb); 5 – Лозоватське (PЗЕ, U, Th); 6 – Калинівське (PЗЕ, U, Th); 7 – Полохівське (Li, Ta, Nb); 8 – Південне (PЗЕ, U); 9 – Тарасівське (PЗЕ); 10 – Жовторіченське (Sc, U, Th, Fe, V); 11 – Новоополтавське (Nb, PЗЕ); 12 – Успенівське (PЗЕ); 13 – Шевченківське (Li); 14 – Воскресенівське (Li); 15 – Крута Балка (Ta, Nb, Li); 16 – Азовське (PЗЕ, Zr, Nb); 17 – Мазурівське (Nb, Zr); 18 – Анадольське (PЗЕ); 19 – Покрово-Київське (Be, PЗЕ); 20 – Петрово-Гнупівське (PЗЕ)

Було проведено ранжування об'єктів рідкісноземельної мінералізації за їх інвестиційною привабливістю (Михайлов та ін., 2021). При цьому промислова цінність родовища (прояву) визначалася за такими критеріями: ступінь геологічного і техніко-економічного вивчення; розмір родовища (прояву), обсяги запасів і ресурсів; вміст корисних компонентів (середні, мінімальні і максимальні значення); товщина і глибина залягання рудних тіл; складність геологічної будови, гірничо-геологічні і гірничо-технічні умови видобутку; комплексність родовища, наявність супутніх корисних компонентів; технологічні особливості процесу збагачення руд.

За результатами проведеного ранжування вітчизняних родовищ та проявів РЗЕ виділено групу найбільш інвестиційно привабливих об'єктів, до якої належать Новоополтавське, Мазурівське, Азовське, Анадольське родовища, рудопрояви Петрово-Гнупівський і Балка Корабельна.

Новоополтавське комплексне карбонатитове рідкіснометалічно-апатитове родовище Приазов'я в Запорізькій області локалізоване в карбонатах чернігівського комплексу в зоні Оріхово-Павлоградського розлому субмеридіонального простягання. Родовище належить до фосфор-рідкісноземельно-рідкіснометалічної рудної формації в карбонатах. Виділяються такі асоціації рідкіснометалічних мінералів: 1) гатчетолітова з баделейтом у кальцитових карбонатах; 2) монацит-церит-фергюсонітова в кальцитових і доломіт-кальцитових карбонатах; 3) пірохлор-колумбітова з цирконом у карбонатитових фенітах; 4) пірохлор-цирконова в сієнітових лужних породах.

Апатитоносні карбонатити, нефелінові і лужні сієніти складають куліподібні крутопадаючі тіла завтовшки від 10–20 до 100 м, що протягуються на відстань від перших сотень метрів до перших кілометрів. Поклади

складені кальцитовими та кальцит-доломітовими карбонатитовими рудами, мають дайко- і штокоподібну форму, рудні мінерали представлені апатитом, присутні монацит, пірохлор, церієвий фергюсоніт, колумбіт, гатчетоліт, циркон, баделейт, ортит, ешиніт і ферсміт. Середній вміст апатиту у карбонатитах становить 10%, іноді досягаючи 30–50 % у невеликих фоскоритових тілах.

Сумарний вміст РЗЕ сягає 0,17–4,6 %; Nb₂O₅ – 0,06–0,3 %; Ta₂O₅ – 0,002–0,003 %; P₂O₅ – 4,3 %. Головним рідкісноземельним мінералом є монацит, в якому вміст РЗЕ досягає 65 %. Монацит має низький вміст торію (0,1–0,3 %), що підвищує цінність концентрату цього мінералу. Крім того, РЗЕ зосереджені в апатиті (середній вміст 1,0–1,5 %, максимальний – 8–11 %), де переважають Ce (0,6–1,1 %) і La (0,1–1,6 %), присутні Y (150–600 г/т), Sm (250–400), Eu (40–150), Tb (40–100), Yb (10–20), Lu (0,3–0,7 г/т). Вміст Sr зазвичай не перевищує 0,5–0,7 %, хоча іноді досягає 1,5–2,5 % і навіть 5 %. Вік мінералізації – 2,19–1,99 млрд років. У лінійних корах вивірювання (до 50–370 м) вміст корисних компонентів підвищується у кілька разів. Прогнозні ресурси родовища за аналогією зі світовими об'єктами такого ж класу, за оцінкою С.Г. Кривдика (Михайлов, Кривдик, 2004), можуть досягати 1 млн т монациту (до 500 тис. т РЗЕ) та 200 млн т апатиту (до 2 млн т РЗЕ) до глибини 500 м.

Практичний інтерес становлять кори вивірювання, де концентруються колумбіт і апатит, товщина яких в окремих ділянках, приурочених до зон розломів, може сягати 300 м.

Крім карбонатитів, рудними породами в межах Чернігівського комплексу можуть бути лужні піроксеніти з ільменітом, а також феніти, де вміст Nb₂O₅ становить 0,15–0,37 %, а цирконію – до 0,7–1,0 %. Рудні мінерали

представлені колумбітом, пірохлор-гатчетолітом та цирконом (Загнітко та ін., 2017).

Ресурси корінних комплексних руд (фосфор, тантал, ніобій, фтор) – 384,7 млн т (Михайлов та ін., 2007). Родовище детально розвідане і підготовлене до експлуатації. Передбачено розробку покладу до глибини 600 м з ціликом заввишки 100 м для перекриття нестійких порід кори вивітрювання. Розробку передбачено проводити знизу камерами із закладкою виробленого простору. За розрахунками лише вилучення РЗЕ з апатиту може окупити всі витрати на освоєння та експлуатацію родовища. ПРАТ "Волинська гірничо-хімічна компанія" отримала спеціальний дозвіл на видобування рідкіснометалічно-

апатитових руд Новоополтавського родовища. На сьогодні видобуток на родовищі не проводиться.

Мазурівське (Октябрьське) родовище в Донецькій області належить до комплексних цирконій-рідкісноземельно-ніобієвих. Воно приурочене до Октябрьського масиву нефелінових сієнітів з пірохлор-цирконієвими рудами в альбітитах та маріуполітах. Масив має форму овалу завдовжки 7–8 і завширшки 5–6 км, витягнутий у північно-східному напрямку (рис. 2). Він складений сублужними основними й ультраосновними породами (габро, піроксенітами, перидотитами), лужними й нефеліновими сієнітами (фойїтами, маріуполітами).

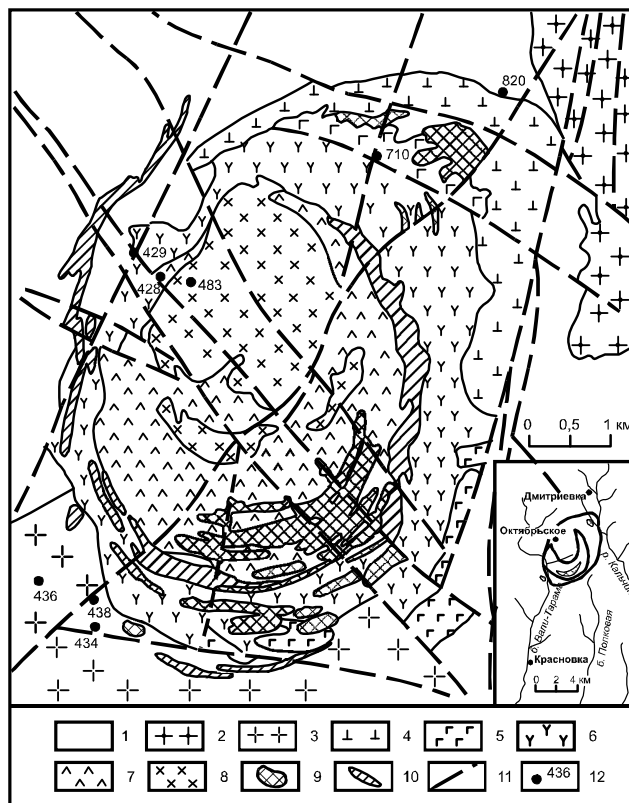


Рис. 2. Схема будови Октябрьського масиву (Донской та ін., 2004):

1 – хлібодарівський комплекс; 2 – анадольський комплекс; 3 – південнокальциєвий комплекс; 4–10 – октябрьський комплекс: піроксеніти (4), габро (5), лужні піроксеніти (6), фойїти (7), пуласкіти (8), маріуполіти (9), лужні метасоматити (10); 11 – розломи; 12 – свердловини та їх номери

У північно-східній частині масиву серед габроїдів і піроксенітів виявлено чотири пологих (до 30–35°) плитоподібних тіл маріуполітів завтовшки від 1 до 79 м (Загнітко та ін., 2017). Породотвірні мінерали маріуполітів представлені нефеліном, альбітом, егірином, іноді мікрокліном; рудні мінерали в маріуполітах і пов'язаних з ними альбітитах представлені пірохлором, цирконом, бритолітом.

Зруденіння контролюється зонами інтенсивної альбітизації на трьох ділянках: Балка Мазурова (0,6×0,8 км), Балка Кошкодієва (0,4×0,5 км), Балка Долиннікова (0,2×0,1 км). Рудні тіла мають форму похило падаючих жиліподібних покладів завтовшки до 30 м, на яких у верхній частині сформована потужна каолінова кора вивітрювання. Рудні мінерали в альбітизованих нефелінових сієнітах, маріуполітах, мікроклін-нефелінових сієнітах представлені цирконом (0,1–1,8 %), і пірохлором (0,2–0,8 %). Кристали циркону здебільшого діпірамідальні, розміром 0,1–0,7 см, але відомі поодинокі знахідки кристалів завбільшки 4 см. Він зазвичай метаміктний,

непрозорий, коричнево-кавового кольору; широко розвинені скелетні й зональні форми. Вміст Hf в цирконі 0,62–1,05 %, РЗЕ – 0,14–0,31 %.

Наявність пірохлору визначає танталоніобієву рідкіснометалічну спеціалізацію родовища. Зустрічається він у вигляді октаедричних кристалів розміром 0,02–0,08 мм, зрідка – 0,5–1,0 мм, переважають кристали медово-жовтого кольору, які утворюють струменисті скупчення. За особливостями хімічного складу мінерал належить до ніобієвих відмін із вмістом Nb₂O₅ 43,60–56,45 %, Ta₂O₅ 3,10–5,42 %, РЗЕ – близько 6 %. Вміст РЗЕ у рудах у середньому становить 0,2 %, у бритоліті – 65 %, у пірохлорі – 1–5 %.

Планується комплексна розробка руд як глиноземистої сировини з попутним вилученням РЗЕ, для чого розроблені технологічні схеми (Донской та др., 2004). Прогнозні ресурси родовища – 200 тис. т TR₂O₃.

Азовське родовище в Донецькій області належить до нового промислово-генетичного типу, не має світових

аналогів. Воно розташоване в північно-східній частині Володарського масиву Приазовського блока; масив складений інтрузивними породами палеопротерозойського південнокальчицького комплексу. Родовище приурочене до серії сієнітових штоків, найбільший з яких – Азовський (1,3 км²), складений лужно-польовошпатовими, піроксен-

амфіболовими і кварцовими сієнітами і пегматитами палеопротерозойського південнокальчицького комплексу (Стрекозов *и др.*, 1998; Melnikov *et al.*, 2000). Широко розвинені амфіболові сієніти і лужні метасоматити. Виявлено 9 рудних тіл, представлених серпоподібними покладами завтовшки до кількох метрів (рис. 3).

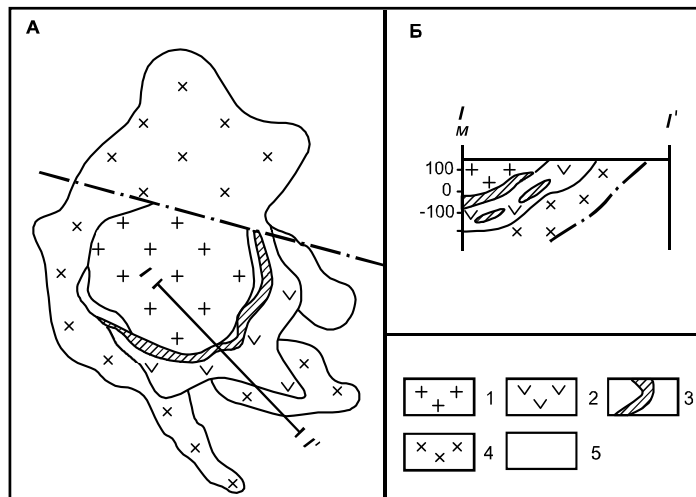


Рис. 3. Схема геологічної будови (А) та розріз (Б) Азовського родовища (Михайлов та ін., 2007):

- 1 – біотитові кварцові сієніти; 2 – такситові сієніти, диференційовані, розшаровані;
3 – рудні горизонти з цирконом та рідкісноземельними мінералами; 4 – плямисті сієніти, слабодиференційовані;
5 – вмісні фаяліт-геденбергітові сієніти Південнокальчицького масиву

Головне рудне тіло має довжину 1640 м, середню товщину 32 м. Рудоносні різновиди найчастіше представлені мезо- та меланократовими сієнітами (з ферогастингситом, геденбергітом, фаялітом), рідше лейкократовими. Руди вкраплені, рудні мінерали: брітолїт (переважає), бастнезит, ортит, циркон, монацит, чевкїніт, ітріалїт, магнетит, рабдофанїт, флюорит. Середній вміст TR_2O_3 – 1,27 %, ZrO_2 – 1,5 % (Melnikov *et al.*, 2000). У технологічній пробі встановлено вміст (% від суми РЗЕ): Се – 46,8; La – 19,0; Nd – 18,5; Pr – 4,3; Sm – 3,3; Dy – 1,7; Er – 0,4; Tb – 0,3; Ho – 0,3; Tm – 0,1; Lu – 0,1 та Y – 0,5; у руді присутні U (0,0012–0,0142) та Th (0,0035–0,094 %).

Циркон утворює густу вкрапленість (1–3 мм), зростки зерен, рудні агрегати, зростки з польовими шпатами, амфіболами, рідкісноземельними мінералами. Брітолїт (головний рідкісноземельний мінерал) утворює вкрапленість, зростки і агрегати призматичних кристалів, неправильної форми з виділенням до 2–3 см у пегматоїдних ділянках. Перебуває в парагенезисі з цирконом, ортитом і рідкісним чевкїнітом. Брітолїт є комплексним рідкісноземельним мінералом, зазвичай переважають його істотно церієві різновиди, в меншій кількості зустрічаються ітрієві. Значний вміст Y (до 6–10 % від суми РЗЕ) підвищує промислову цінність сировини. Ортит асоціює із цирконом і брітолїтом, а в катаклазованих ділянках разом з магнетитом і флюоритом виповнює прожилки в польовошпатовій масі. Бастнезит спостерігається у вигляді окремих виділень, гніздоподібних скупчень, включень у цирконі, флюориті і жильних мінералах, у складі псевдоморфоз по брітолїту і ортиту. Містить (%): Y_2O_3 – 4,14, TR_2O_3 – 56,36; La – 12; Се – 21; а також (г/т): Sm – 105, Eu – 1070, Th – 2700, Yb – 42, Lu – 0,8.

Прогнозні ресурси родовища до глибини 300 м оцінюються в 56 млн т руди із середнім вмістом TR_2O_3 1,27 % (при бортовому – 0,4) та Zr_2O_3 – 1,5 %, або 710 тис. т TR_2O_3 , з яких 20 % представляють Y-лантанові іди, а також 840 тис. т Zr_2O_3 .

Технологічні дослідження руд показали можливість застосування схеми гравітаційно-магнітного збагачення їх зернистої фракції та флотаційного збагачення шламів. Переробка концентратів на селективні рідкісноземельні продукти можлива на Придніпровському хімзаводі (м. Кам'янське). Технологія гідрометалургійного очищення дозволяє переводити в розчин близько 72–97 % РЗЕ, які можуть бути легко екстраговані з нього за допомогою іонно-обмінної технології. Цирконовий концентрат відповідає сорту "цирконовий концентрат металургійний", польовошпатовий придатний для використання у скляній промисловості.

На жаль, початок промислового відпрацювання родовища стримується технологічними і економічними труднощами. Справа в тому, що РЗЕ на родовищі сконцентровані в основному в силікатній формі – брітолїті, який за фізичними властивостями і вмістом РЗЕ значно поступається монациту, що і зумовлює низькі показники технологічного вилучення. Отриманий концентрат із вмістом TR_2O_3 близько 13 % неконкурентоспроможний щодо стандартного світового монацитового концентрату, в якому кількість TR_2O_3 досягає 55 %, що зумовлює необхідність проведення додаткових технологічних досліджень.

КП "Південукргеологія" у минулі роки були проведені пошуково-оціночні роботи й підраховані запаси та перспективні ресурси комплексних цирконій-рідкісноземельних руд.

Анадольське родовище представлене рудною зоною, що перетинає анадольські граніти і метаморфічні породи західноприазовської серії на південний схід від Октябрського масиву. Зона (0,7–3,0 м) протяжністю 1000 м полого занурюється (30–45°) на південний захід і простежена на глибину 400 м. Вона характеризується жильно-прожилковою флюорит-апатит-ортитовою мінералізацією із вмістом TR_2O_3 – 0,1–16,7 % (середній – 9,23 %). Руди масивні, плямисті, грубо- і тонкосмугасті, із

високим вмістом Fe_2O_3 , Ca, підвищеним – Mn, P і F, низьким – SiO_2 і Al_2O_3 . Рідкісноземельні мінерали представлені ортитом, церитом, цербаствезитом, апатитом і флюоритом. Ортит утворює гнізда й лінзи (до 10–15 см) снопо- і віялоподібних агрегатів видовжених призматичних кристалів (0,5–1,5 мм), містить 23,7 % TR_2O_3 . Церит утворює вкраплення дрібних ксеноморфних й ізометричних зерен (0,5–2,0 мм) серед агрегатів ортиту, включення у флюориті, містить 70,1 % TR_2O_3 . Баствезит приурочений до міжзернових ділянок ортиту і заміщує останній. Вміст TR_2O_3 в баствезиті – 60%. Апатит і флюорит (2,9 і 0,8–1,12 % TR_2O_3 відповідно) утворюють у смугастих рудах тонкі прошарки, які чергуються з прошарками ортиту, за хімічним складом належать до церієвих різновидів апатиту і флюориту. Запаси руди родовища значні, її промислові дослідження на Придніпровському хімзаводі дали позитивні результати.

Петрово-Гнупівський прояв розташований у долині р. Кальміус на північному сході від м. Маріуполя, представлений крутопадаючою флюорит-рідкісноземельно-карбонатною жилкою (до 3 м) в фенітизованих граносієнітах ендоконтактової зони Кальміуського масиву. Жила простежена в північно-східному (20°) напрямку до 1 км і на глибину понад 150 м. Вона складена грубозернистими і масивними агрегатами кальциту, баствезиту, паризиту і флюориту. Вмісні діалогові сієніти лежачого боку рудного тіла фенітизовані (25–30 м). Феніти представлені альбітизованими калішпатовими породами з опалоподібним блакитним кварцом і утворюють штокверкову систему прожилків із високою (до 11 %) концентрацією ортиту. У всьому боці граносієніти перетворені на апатит-сфен-альбіт-арфведсоніт-егіринові феніти з цирконом, чевкитом, ільменітом, магнетитом і гематитом.

Ця зона (до 10 м) перетинається прожилками титаніту (який містить 0,37 % Nb_2O_5 і 1,28 % TR_2O_3), флюориту і кальциту. У контактній всьому боці рудного тіла відзначаються облімкові флюорит-карбонат-егіринового складу. Рудні парагенезиси представлені ранньою асоціацією флюоцерит, баствезита, паризита, кальциту і пізньою – флюориту, галеніту, аргентиту і інших сульфідів. Ізотопний вік галеніту – 2,1–1,92 млрд р. Головні рудні мінерали – баствезит і паризит – у зростках із кальцитом утворюють блоки і гнізда (0,6–0,8 м). Іноді вміст рідкісноземельних фторкарбонатів досягає 15–20 % при вмісті TR_2O_3 62,6 % у баствезиті й 52,3 % – у паризиті. Руда має селективний церієвий склад. У паризиті La + Nd сягають 94,7 % і Sm + Lu – 5,3 %, а у флюориті вміст Y і важких лантанодів – 87,6 і 98,3 % від вмісту РЗЕ.

Прояв Балка Корабельна, виявлений у 1959 р., представлений крутопадаючим лінзоподібним покладом інтенсивно катаклязованих порід північно-східного простягання серед гранітизованих гнейсів і мігматитів, які перетинаються жилами рожевого пегматиту (до 0,5 м). Поклад завдовжки 70 м і завширшки 40 м простежено на глибину 50 м. Товщина окремих рудних тіл досягає 20 м. Вміст у руді (%): РЗЕ – до 4,4, Th – 0,6, U – до 0,2, Yb – 0,092, La – 0,177, Gd – 0,05, Er – 0,092, Dy – 0,12, Pr – 0,055, Nd – 0,197, Sm – 0,046, Ce – 0,485, Y – 0,945. Рудні тіла представлені дрібнозернистим вкрапленням і сегрегаціями монациту, ксенотиму і апатиту в крупнокристалічній породі, що складається з біотиту, польового шпату і кварцу за підпорядкованою ролі альмандину і магнетиту. Головні рудні мінерали представлені монацитом і ксенотимом, менше – апатитом і уранінітом. Основна маса рідкісноземельних фосфатів у рудних тілах приурочена до ділянок біотитової породи, яка зазнала мікроклінізації.

Рідкісноземельні фосфати, присутні в біотиті у вигляді одиночних зерен, при мікроклінізації біотиту укрупнюються й утворюють сегрегації уздовж тріщин його спайності і на контакті з мікрокліном. Монацит і ксенотим концентруються переважно в магнетиті, утворюючи в ньому зернисті агрегати й окремі кристали. В апатиті присутні включення ксенотиму і монациту неправильної форми, які, ймовірно, представляють першу генерацію рідкісноземельних фосфатів. Ксенотим містить (%): U – 1,64; Th – 0,92; La – 0,2; Ce – 0,6; Pr – 0,2; Nd – 0,7; Sm – 0,9; Eu – 0,1; Gd – 2,7; Tb – 0,5; Dy – 7,3; Ho – 2,0; Er – 6,7; Tu – 1,1; Yb – 8,5; Lu – 1,6; Y – 30. Зустрічаються монацит високоурановий (1,1 % U) і низькоурановий (близько 0,1 % U). Ізотопний вік ксенотиму і високоуранового монациту – 2045–1815 млн р.

Крім описаних, певний інтерес стосовно рідкісноземельної мінералізації можуть становити Хашуватське родовище в корі вивітрювання уманських рідкісноземельних гранітів, а також титан-циркон-ільменітові розсипи в Житомирській обл. (р. Гнилоп'ять, Соб, Роставиця, Желівська балка) і Приазов'ї (р. Кальчик, прибережно-морські розсипи Азовського моря), які також можуть стати додатковим джерелом РЗЕ. Середній вміст монациту – від 120–144 (Волинь) до 450–900 г/т (Приазов'я).

Цирконій. Україна володіє значними запасами цирконію, які пов'язані з розсипними і корінними родовищами. У Державному балансі обліковуються запаси 3 корінних, 8 розсипних родовищ, 4 – техногенних рудних пісків і одне техногенне родовище, представлене відходами збагачення вивітрілих руд (*Мінеральні ресурси...*, 2020). За оцінками західних експертів, ресурси цирконію (Zr_2O_3) в Україні сягають 840 тис. т, а щорічний видобуток – 18 тис. т.

Розроблюються комплексні розсипні родовища Малишевське (Вільногірський гірничо-металургійний комбінат і ТОВ "Мотронівський ГЗК") і Вовчанське (ТОВ "Демурінський ГЗК"), а також техногенне родовище Балка Крута (ТОВ "Кольорові метали"); готуються до розробки Тарасівське (ТОВ "Рутил-ільменітова компанія") і Тростянецьке (ТОВ "Житомирбуррозвідка") родовища (Мінеральні ресурси..., 2020).

Головним джерелом цирконію в Україні наразі є розсипні родовища, представлені розсипами чотирьох типів: 1) прибережно-морськими комплексними циркон-рутил-ільменітовими (Малишевське); 2) ільменітовими алювіальними континентальними (Вовчанське, Тарасівське, Краснокутське, Зеленоярське та ін.); 3) ільменітовими та апатит-ільменітовими елювіальними в корі вивітрювання основних порід; 4) циркон-рутил-ільменітовими розсипами піщаних пляжів і мілководного шельфу (Джарилгацьке). Найбільший інтерес за комплексних розсипних родовищ щодо інвестиційної привабливості становлять північно-західна ділянка Малишевського родовища і Тарасівське родовище.

Малишевське (Самотканське) родовище (Ti-Zr) у басейні р. Самоткань (правої притоки Дніпра) у Дніпропетровській області відкрите у 1954 р., розроблюється з 1961 р. Воно представлене прибережно-морським розсипом у сарматських відкладах (довжина 19 км, ширина 2,5 км, товщина 35 м), у складі якого виділяється ряд ліноподібних покладів завтовшки до 15–18 м, збагачених корисними компонентами: рутилом (середній вміст 24 кг/м³), ільменітом (77 кг/м³), цирконом (8–9 кг/м³). Родовище розроблюється відкритим способом, на його базі працює Вільногірський ГЗК, який у своєму складі має фабрику обезводнювання і збагачення, де відбувається дезінтеграція, знешламливання, гравітаційне збагачення,

сушка, розділення колективного концентрату з використанням електричних та магнітних методів збагачення. Основними продуктами збагачення є рутиловий (понад 95% TiO_2), ільменітовий (понад 63% TiO_2), цирконовий, ставролітовий, дистен-силіманітовий концентрати.

Північно-західна ділянка Малишевського родовища (Ti, Zr) на межі Кіровоградської і Дніпропетровської областей площею 3 309,8 га представлена прибережно-морським розсипом у кварцових сірих тонкозернистих пісках полтавської серії, частково – сарматського ярусу міоцену. Піски складені кварцом, глинистими мінералами, важки мінерали: циркон, рутил, ільменіт, лейкоксен, дистен, силіманіт, ставроліт, турмалін, шпінель, хроміт, монацит. Запаси титан-цирконієвих руд встановлені за категорією С₂, але ця інформація є закритою. Підраховані за категорією С₂ запаси супутніх корисних копалин: дистен+силіманіт – 1 407,8 тис. т, ставроліт – 567,9 тис. т (Інвестиційний атлас..., 2021).

Тарасівське родовище на р. Рось у Київській області представлено розсипом завдовжки до 20 км, у прибережно-морських, частково дельтових відкладах полтавської серії. Піски білі, зеленувато-сірі, у рудних прошарках коричневі, мілко- крупнозернисті. Розподіл рудних мінералів у продуктивному пласті нерівномірний. Найвищі концентрації відмічені в південно-західній частині розсипу, де на окремих ділянках вміст важкої фракції сягає 100–200 кг/м³, причому сумарна частка ільменіту, рутилу, циркону становить 75 %; крім того, присутні монацит, ксенотим, каситерит, бадделеїт, целестин. Товщина рудовмісної товщі – від 0,5 до 30 м (середня 7 м), розкривних порід від 1,5 до 47,5 м (середня 27 м), середній вміст (кг/м³) циркону 10,4, рутилу 12,0, ільменіту 23,0. Родовище може розглядатися як резервна база Вільногірського ГЗК.

Крім того, з розсипних родовищ інтерес можуть становити Вовчанське у Дніпропетровській області,

Краснокутське у Харківській, Зеленоярське в басейні р. Роська і Мокро-Ялинська група розсипів у Приазов'ї.

Крім розсипних, потенційним джерелом цирконію в Україні можуть бути корінні родовища Азовське, Мазурівське (описані вище), Яструбецьке.

Яструбецьке родовище розташоване у південно-західній частині Пержанського рудного вузла, пов'язане з однойменним масивом лужних сієнітів, до якого приурочено кілька серпоподібних рудоносних зон (довжина до 2 км, товщина до 5–120 м), збагачених цирконом (рис. 4). Є також ільменіт, магнетит, апатит, ортит, бастнезит, паризит, флюорит, бритоліт та ін. Сумарний вміст РЗЕ в окремих тілах досягає 0,07–0,3 %, іноді – 1,24 % (Гурський, 2008).

Багаті цирконієві руди виявлені бурінням на глибинах 500–1000 м, де вони складають декілька збагачених цирконом горизонтів завтовшки до декількох метрів (Загнітко та ін., 2017).

Головними рудними мінералами є бритоліт та циркон; вміст TR_2O_3 у бритоліті може досягати (%): Y_2O_3 – 10; ZrO_2 – 5–6; Ce_2O_3 – 15–16; La_2O_3 – 6–7; Gd_2O_3 – 1; Yb_2O_3 – 0,6; Th_2O_3 – 0,4; Eu_2O_3 – 0,1 (Кривдик та ін., 2000). У цирконі вміст РЗЕ становить 1,24% при вмісті Hf 0,8 % та такому складі РЗЕ (від 100 %): La – 1,30; Ce – 2,26; Pr – 0,6; Nd – 1,54; Sm – 2,86; Gd+Eu – 4,46; Tb+Y+Dy – 65,86; Ho – 2,66; Er – 5,14; Tm – 1,95; Yb – 11,10; Lu – 0,27 (Нечаєв та ін., 1986). Склад циркону суттєво ітрієвий, а бритоліту – ітрій-церієвий. Родовище вважається великим, проте значна глибина залягання відомих рудних тіл (понад 500 м) ускладнює його можливу промислову розробку. Воно може бути джерелом супутнього видобутку такої нерудної сировини, як польові шпати і флюорит.

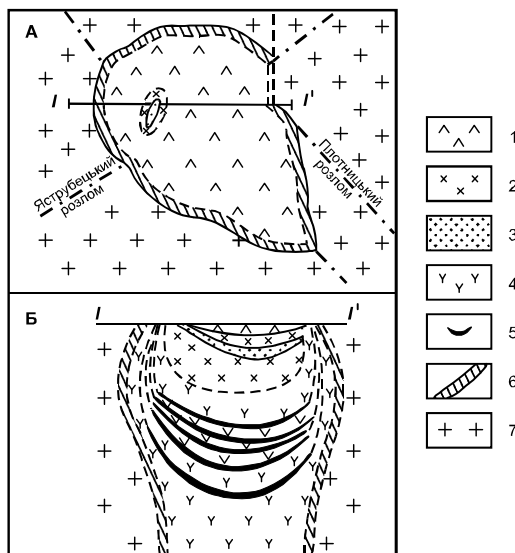


Рис. 4. Схема будови Яструбецького родовища (А – план, Б – розріз) (Кривдик та ін., 2000):

1 – сієніти верхньої розширеної групи; 2 – рибекітові сієніти; 3 – егіринові сієніти; 4 – сієніти головної розширеної групи; 5 – рудні горизонти, збагачені цирконом; 6 – ендоконтактні сієніти; 7 – вмісні гранітоїди

Літій – один з критично важливих елементів для всієї цивілізації. За ресурсами літію Україна посідає одне з провідних місць у Європі (Бакаржигев та др., 2000; Еременко та др., 1996; Іванов та ін., 2000). Родовища літію в Україні пов'язані з ранньодокембрієвими рідкіснометалічними

пегматитами УЩ. Розвідано три родовища, запаси яких обліковуються у Державному балансі запасів корисних копалин України (ці відомості є закритими): Шевченківське (сподуменові руди) Сорокинсько-Шевченківського пегматитового поясу в Донецькій області, Полохівське

(петалітові руди) та Станкуватське (ділянка Добра) (сподумен-петалітові руди) родовища Шполянсько-Ташлицького рудного району в Кіровоградській області. Вони складені переважно петалітовими і сподумен-петалітовими, зрідка – сподуменовими рудами, вміст Li_2O коливається від 0,25 до 2,23 %, зрідка до 6,55 %, у середньому 1,0–1,25 %.

З них на Полохівському родовищі ТОВ "Укрлітвидобування" має спеціальний дозвіл (ліцензію) на видобуток літію, пропозиції для ліцензування відкрито для

Шевченківського та Станкуватського (ділянка Добра) родовищ та ділянки Балка Крута у Запорізькій області.

Шевченківське родовище сподуменових руд розташоване в північно-східній частині Приазовського блока УЩ, у межах Шевченківської грабеніподібної структури, яка складена кристалосланцями та гнейсами сорокинської світи осипенківської серії неогархею-палеопротерозою, метаморфізованими в умовах зеленокам'яної та амфіболітової фацій, які прорвані рідкіснометалічними пегматитами (рис. 5).

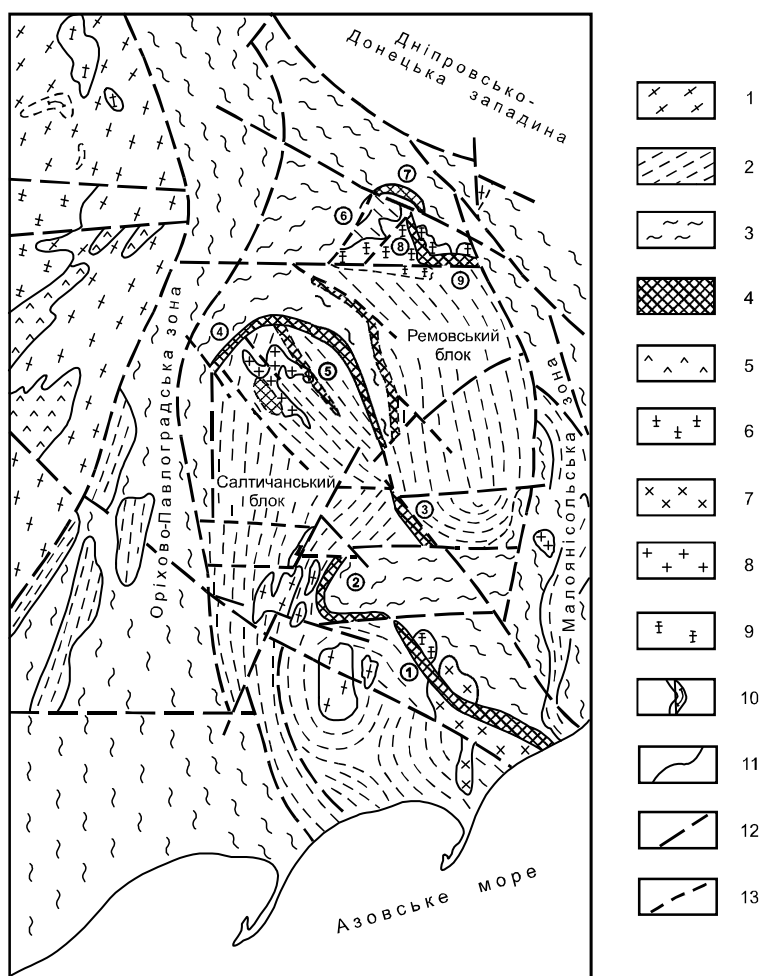


Рис. 5. Схема геологічної будови Сорокинсько-Шевченківського пегматитового поясу (Ісаков, Бобров, 2000):

- 1 – метаморфічні та ультраметаморфічні утворення дніпропетровського комплексу; 2 – метаморфічні породи західноприазовської серії та ультраметаморфічні утворення новопавлівського комплексу; 3 – метаморфічні утворення центральноприазовської серії та ультраметаморфічні утворення шевченківського комплексу; 4 – ЗКС, складені породами осипенківської серії, з пегматитовими полями Сорокинсько-Шевченківського пегматитового поясу; 5 – зеленосланцеві породи конкської серії, граніти мокромосковського комплексу; 6 – граніти біотитові; 7 – габродіорити, кварцові діорити, гранодіорити, біотитові граніти добропільського комплексу; 8 – граніти; 9 – гранодіорити і граніти воскресенського комплексу; 10 – карбонатити, сієніти, альбітити, нефелінові сієніти, піроксеніти чернігівського комплексу; 11 – межі геологічних утворень; 12 – регіональні глибинні розломи I і II порядків; 13 – розломи більш високих порядків. Цифрами позначені ЗКС: 1 – Сорокинська, 2 – Олексіївська, 3 – Куйбишевська, 4 – Гайчурська, 5 – Косівцевська, 6 – Дібровська, 7 – Волчанська, 8 – Шевченківська, 9 – Федорівська

Виявлено шість пегматитових тіл, що утворюють єдину жильну систему субмеридіонального простягання з падінням на захід під кутами 85–88°. Тіла мають роздуви та пережими, розміри 144–1076 м у довжину та від 2 до 84 м завтовшки, в основному вони виклинюються на глибині 350–500 м.

Два жильні тіла є головними та вміщують майже всі запаси літію розвіданої частини родовища. Їхня середня товщина досягає 40 м, довжина 600–700 м. Рудоносні пегматити мають зональну будову (із зовнішньої зони):

- 1) контактна кварц-альбітова дрібнозерниста; 2) альбіт-мікроклінова пегматоїдна; 3) кварц-альбітова різнозерниста; 4) альбіт-сподуменова; 5) мікроклін-сподуменова; 6) петаліт-сподуменова; 7) зона блокового мікрокліну. Речовинний склад пегматитових тіл простий: 90–95 % їхнього об'єму складений головними породотвірними мінералами – альбітом, мікрокліном, кварцом, 5–10 % – сподуменом та, меншою мірою, петалітом, з яким пов'язано менш ніж 4 % запасів літію родовища. Встановлено рідкісні літєві слюди та фосфати, рідкіснометалічні

мінерали ніобію, танталу, берилію, олова. Головним носієм літію на родовищі є кварц-альбіт-сподуменовий (з мікрокліном та петалітом) мінеральний комплекс внутрішніх зон пегматитових тіл. Сподумен у ньому утворює блоки розміром 8–10 см, петаліт – дрібнозернисті гнізда розміром до 5–20 см. Вміст оксиду літію – 1,1–1,5 %, понад 95 % запасів пов'язані зі сподуменом. На родовищі виділяються два типи руд: сподуменовий (альбіт-мікроклін-сподуменовий) та петаліт-сподуменовий. Вміст оксиду літію у рудах змінюється в межах 0,3–0,4 % та в середньому становить 1,22 %.

Крім основного компоненту, відмічено підвищений вміст рубідію, цезію, танталу, ніобію, берилію, олова. Крім того, породотвірні мінерали, насамперед польові шпати, можуть слугувати сировиною для керамічної та скляної промисловості.

За результатами дослідження технологічних проб повне вилучення сподумену при збагаченні становить 88–92 % за загального виходу концентрату в середньому 22,8 %. Концентрат містить у середньому 4,9 % літію і

відповідає сорту "Сподуменовий концентрат; 4,0–7,0 % Li_2O " західноєвропейського ринку.

Відомості про запаси літєвих руд родовища є закритими. Методом експертної оцінки, за аналогією з подібними родовищами світу, можемо оцінити його ресурси приблизно в 30–35 млн т руди та 400–450 тис. т Li_2O . Затверджені запаси кварцу сягають 4 863,6 тис. т, слюди – 527,2 тис. т, оцінені також запаси танталу, ніобію, берилію (Інвестиційний атлас..., 2021).

Полохівське родовище петалітових руд розташоване у межах палеопротерозойської синкліналі, яка облямовує з південного заходу Корсунь-Новомиргородський плутон. Вона складена дислокованими кордієрит-біотитовими, гранат-кордієрит-біотитовими, біотитовими, гранат-діопсид-біотитовими плагіогнейсами з ін'єкціями апліт-пегматоїдних та двопольовошпатових різнозернистих біотитових гранітів кіровоградського комплексу (1,9–2,1 млрд років). Родовище складене трьома крутопадаючими рудними тілами, що залягають згідно зі смугастістю гнейсів та лінійністю гранітоїдних ін'єкцій (рис. 6).

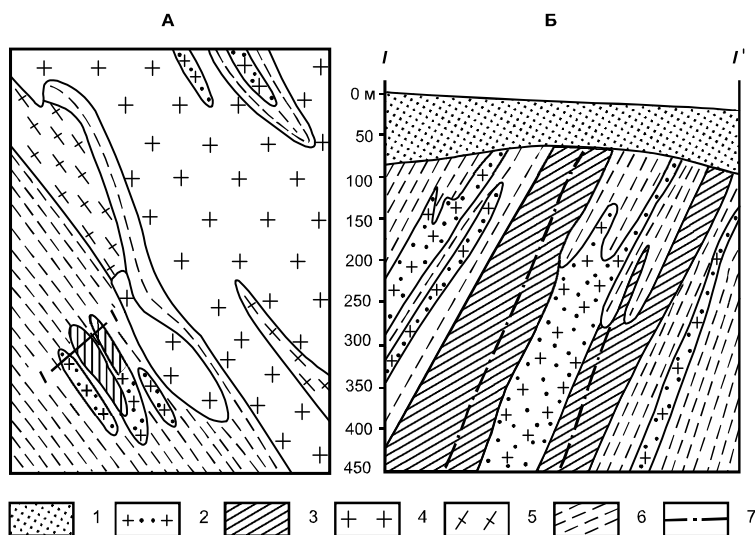


Рис. 6. Схематична геологічна карта (А) та розріз (Б) Полохівського родовища (Еременко и др., 1996):

- 1 – осадові відклади чохла; 2 – пегматоїдні граніти з убогою літєвою мінералізацією;
3 – пегматити з багатою літєвою мінералізацією (петаліти); 4 – граніти; 5 – мігматити;
6 – гнейси біотитові та кордієрит-біотитові; 7 – розривні порушення

Найбільше рудне тіло простежено за простяганням на 550 м, за падінням – до глибини 800 м, має середню товщину 60 м; інше рудне тіло завтовшки від 13 до 75 м простежується за простяганням на 350 і на глибину до 400 м; третє рудне тіло має значно менші характеристики. Середній вміст Li_2O у першому рудному тілі 1,25 %, у другому – 1,21 %, у третьому – 1,04 %. Рудні тіла складені (%): петалітом (27,6–36,2), альбітом (26,3–28,0),

пертитовим калішпатом (19,1–20,9), кварцом (15,8–21,7). Основним носієм літію є петаліт, який містить 91–95 % від загальної кількості літію в руді. Він формує дрібнозернисті мономінеральні скупчення гранобластової структури розміром до 10–20 см або зустрічається у вигляді розсіяних дрібних включень у мікроклін-кварц-альбітовому матриксі. Склад петаліту наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад петаліту Полохівського родовища (сверд. 26–90), % (Возняк та ін., 2000)

Компонент	1	2	3	4	5
SiO_2	78,34	77,82	77,90	78,36	76,58–77,64
Al_2O_3	16,16	16,18	15,66	15,88	17,04–17,30
Fe_2O_3	0,15	0,16	0,15	0,21	0,09–0,11
FeO	0,59	0,51	1,16	0,89	–
CaO	–	–	–	–	0,11–0,22
Li_2O	4,24	4,10	4,25	4,13	4,00–4,80
Na_2O	0,23	0,74	0,45	0,41	0,10–0,20
K_2O	0,20	0,43	0,32	0,21	0,13–0,18
H_2O^+	0,34	0,60	0,05	0,45	–

1 – петаліт-альбітовий пегматит гл. 243 м; 2 – альбіт-петалітовий пегматит гл. 301 м; 3 – пегматит альбітовий з петалітом гл. 314,8–318,0 м; 4 – пегматит мікроклін-альбітовий з петалітом, гл. 321,5–324,5 м; 5 – технологічні проби

Вміст сподумену в рудах родовища не перевищує 2 %, його розподіл нерівномірний, зустрічається він переважно у сильно кородованих реліктах вихідного пегматиту разом із кварцом. Склад сподумену наведено в табл. 2, хімічний і мінеральний склад руд – у табл. 3, 4.

З руд родовища петалітовий концентрат можна отримувати екологічно безпечним гравітаційним збагаченням. Відомості про запаси родовища є закритими. Методом експертної оцінки, за аналогією з подібними родовищами світу, можемо оцінити його ресурси приблизно в 65 млн т руди та 800 тис. т Li_2O .

Таблиця 2

Хімічний склад сподумену Полохівського і Станкуватського родовищ, % (Возняк та ін., 2000)

Компонент	Полохівське родовище				Станкуватське родовище
	1	2	3	4	5
SiO_2	63,58	63,74	63,75	64,17	64,17
Al_2O_3	26,34	26,89	27,06	26,99	27,18
Fe_2O_3	0,84	0,25	0,10	0,34	0,09
FeO	0,72	0,57	0,72	0,26	0,48
CaO	0,34	Сліди	0,06	0,12	0,03
Li_2O	6,70	6,99	7,10	7,04	7,14
MgO	0,08	Сліди	Сліди	0,08	-
MnO	Сліди	Сліди	Сліди	0,04	0,05
Na_2O	0,46	0,96	0,46	0,67	0,84
K_2O	0,21	0,34	0,10	0,07	0,03
H_2O^+	0,56	0,04	0,44	0,08	0,57
Сума	99,50	99,91	99,93	100,08	99,16

1 – мікроклін-альбітовий пегматит зі сподуменом, св. 26–90, гл. 134 м; 2 – мікроклін-альбітовий пегматит зі сподуменом і петалітом св. 26–90, гл. 270–274,3 м; 3 – кварц-сподуменові виділення у мікроклін-альбіт-петалітовому пегматиті св. 26–90, гл. 303 м; 4 – кварц-сподуменові виділення в альбіт-петалітовому пегматиті св. 7–92, гл. 381,5 м; 5 – кварц-плагіоклазова зона з рідкісними виділеннями сподумену у приконтатковій частині з вмісним амфіболітом св. 32–91, гл. 282,8 м

Таблиця 3

Хімічний склад руд Полохівського і Станкуватського родовищ, % (Еременко и др., 1996)

Компонент	Полохівське	Станкуватське	
	Руда петалітова	Руда сподуменова	Руда петаліт-сподуменова
SiO_2	74,94	72,03	72,12
Al_2O_3	15,58	16,91	16,62
TiO_2	0,22	0,27	0,36
CaO	0,32	0,35	0,47
MgO	0,08	0,14	0,09
Na_2O	3,66	3,67	3,86
K_2O	2,71	2,58	2,18
Li_2O	1,10	1,79	1,49
Pb_2O	0,04	0,10	0,10
H_2O^-	0,11	0,11	Не визн.
H_2O^+	0,26	0,86	0,49
CO_2	0,35	0,14	0,22
P_2O_5	0,48	0,89	1,14
Сума	99,85	99,84	99,14
Ta_2O_5	0,002	Не визн.	0,006
Nb_2O_5	0,002	0,006	0,006
SnO_2	0,008	0,05	0,04
BeO	0,032	0,012	0,033

Таблиця 4

Мінеральний склад руд Полохівського і Станкуватського родовищ (Еременко и др., 1996)

Компонент	Полохівське	Станкуватське	
	Руда петалітова	Руда сподуменова	Руда петаліт-сподуменова
Кварц, %	14,3	14,0	14,1
Мікроклін, %	23,5	18,8	14,8
Альбіт, %	34,0	31,1	33,9
Петаліт, %	24,9	6,6	14,0
Сподумен, %	0,8	25,3	20,3
Трифіліт, %	0,2	1,5	1,4
Апатит, %	0,8	0,1	0,3
Мусковіт, гранат, кальцит, кордієрит, силіманіт, %	1,5	2,7	1,2
Хризоберил, г/т	1165	1125	1650
Каситерит, г/т	90	450	400
Фероколумбіт, г/т	55	500	500

Станкуватське родовище (ділянка Добра) сподумен-петалітових руд представлено двома рудо проявами: Станкуватським і Надія в Кіровоградській області, у західній зовнішній зоні Липнязького гранітного куполу

(рис. 7). Ядро куполу складене гранітами кіровоградського комплексу, периферія – гранітними пегматитами. Літєві пегматитові тіла залягають в ортоамфіболітах та мафіт-ультрамафітових породах західного облямування

куполу, метаморфізованих в умовах амфіболітової фації. Рудну зону Станкуватського прояву простежено за простяганням на 2 км, прояву Надія – на 1,6 км.

Родовище складене серією (8–12) зближених крутопадаючих тіл літєвих пегматитів завтовшки від перших десятків сантиметрів до 25–30 м. Загальна товщина продуктивної зони досягає 140–150 м, потужніші рудні тіла зосереджені у центральній частині. Вміст Li_2O в окремих рудних тілах змінюється від 0,345 до 2,23 %, у середньому – 1,26 %. На відміну від Полохівського родовища, руди комплексні, сподумен-петалітові, із вмістом сподумену до 20–25 %. Серед рудних мінералів Станкуватського прояву переважає петаліт, прояву Надія –

сподумен. Виділяють 4 типи руд: петалітові (32 %), сподуменові (28 %), сподумен-петалітові (17 %) і петаліт-сподуменові (23 %). Присутність двох літєвих мінералів є фактором, що ускладнює технологію збагачення руд, оскільки зумовлює необхідність селективного вилучення сподуменового і петалітового концентратів.

Відомості про запаси літєвих руд родовища є закритими. Методом експертної оцінки, за аналогією з подібними родовищами світу, можемо оцінити його ресурси приблизно в 60 млн т руди та 750 тис. т Li_2O . Крім того, на родовищі враховано прогнозні ресурси рубідію, цезію, танталу, ніобію, берилію, олова (*Інвестиційний атлас...*, 2021).

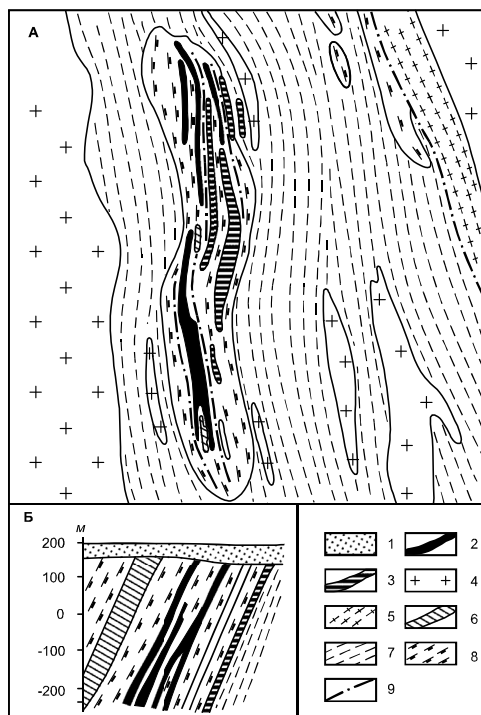


Рис. 7. Схематична геологічна карта (а) та розріз (б) Станкуватського родовища (Еременко и др., 1996):

1 – осадові відклади чохла; 2 – пегматити з багатою літєвою мінералізацією; 3 – пегматити з бідною літєвою мінералізацією; 4 – граніти; 5 – мігматити; 6 – піроксеніти; 7 – гнейси; 8 – амфіболіти; 9 – розривні порушення

Прояв Крута Балка в Запорізькій області пов'язаний з пегматитами, локалізованими в архейських метаморфічних породах Сорокинської зони Приазов'я. Тут виділено три рудні зони, вміст корисних компонентів наведено в табл. 5 (*Інвестиційний атлас...*, 2021).

Характерне зональне розміщення рудних тіл – кварц-альбітові зі сподуменом тіла приурочені до верхніх горизонтів, а майже безрудні мікроклінові – до нижніх. Виділяють два типи пегматитів (*Загнітко та ін.*, 2017). Для першого характерна наявність зони блокового мікрокліну та кварцу (50 % об'єму) і рудної кварц-альбіт-

сподуменової зони (30 % об'єму). Другий тип представлений великими лінзо- та плитоподібними тілами з роздувами та апофізами, з кварц-альбітовою (до 25 %) та кварц-альбіт-сподуменовою зонами (до 60 %). Переважна більшість промислових тіл належить до другого типу. Головним рудним мінералом є сподумен, але промислове значення мають також берил, тантало-ніобати, літєві фосфати, кукейт, холмквістит. Співвідношення Ta/Nb сильно коливається. Вважається, що пегматити родовища належать до альбітового і альбіт-сподуменового типу (*Суярко та ін.*, 2008).

Таблиця 5

Вміст корисних компонентів рудних зон родовища Балка Крута (%)

Зона	Ta_2O_5	Nb_2O_5	Li_2O	Rb_2O	Cs_2O	РЗЕ
Перша	0,001–0,268	0,001–0,036	0,008–4,0	0,006–0,094	0,001–0,041	–
Друга	0,001–0,176	0,0015–0,022	0,02–6,55	0,005–0,395	0,001–0,129	до 0,009
Третя	0,001–0,0188	0,001–0,009	0,02–1,43	0,001–0,096	0,001–0,033	до 0,007

У результаті ГРР попередньо підраховано запаси основних корисних копалин – літію, танталу, ніобію, цезію, рубідію в пегматитах і слюдитах, а також супутніх польового шпату у кількості 809,8 тис. т, кварцу у

кількості 582,6 тис. т і слюди у кількості 205,1 тис. т (*Інвестиційний атлас...*, 2021).

Отже, загальні ресурси літію родовищ України можуть досягати 2,0 млн т, завдяки чому вона належить до

провідних країн за ресурсами цього металу і може повністю забезпечити необхідні для зелених технологій обсяги його видобутку.

Скандій. Україна посідає перше місце в Європі і входить до світових лідерів за запасами скандію. Його запаси оцінено в комплексних залізо-уран-ванадій-скандієвому Жовторіченському, апатит-ільменітових Стремигородському, Торчинському корінних родовищах та Злобицькому розсипному ільменітовому родовищі, ресурси – у розсипних ільменітових та рутилових родовищах. Запаси скандію обліковуються у Державному балансі запасів корисних копалин України по 13 комплексних родовищах: Малишевське, Валки-Гацьківське, Вовчанське, Жовторіченське, Стремигородське, Федорівське, Тростянецьке,

Злобицьке, Торчинське, Іршанське, Лемненське-Західне, Лемненське-Східне, Тарасівське, з яких шість – розробляються (*Мінеральні ресурси...*, 2020).

Найцікавішим об'єктом є комплексне залізо-уран-ванадій-скандієве **Жовторіченське родовище** у Дніпропетровській області. Як залізородне родовище воно розробляється ще з 1934 р. Скандієві руди тут було відкрито в 1976 р. Вони представлені кварц-натрієвими метасоматитами з уранінітом і бранеритом і ванадій-скандієвими рудами, які локалізовані серед діопсидових кварцитів, актинолітових сланців, частково доломітів криворізької серії (Загнітко та ін., 2017). Протяжність рудної зони становить 100 м, товщина не перевищує перші десятки метрів (рис. 8).

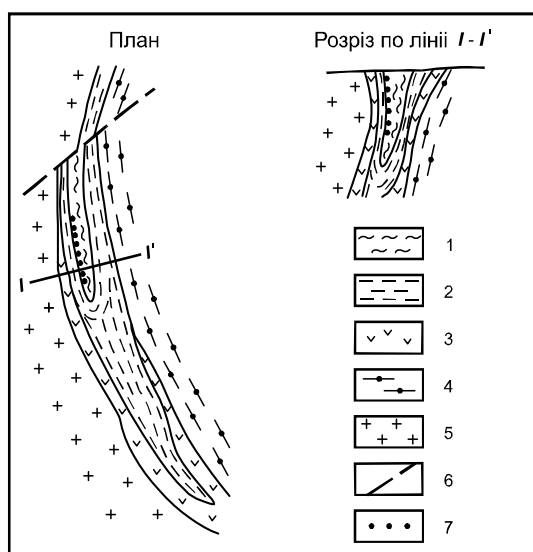


Рис. 8. Положення зони скандієвого зруденіння в західному крилі Жовторіченської синкліналі (Тарханов и др., 1991):

1 – гданцевська світа; 2 – саксаганська і скелюватська світи; 3 – конксська серія, амфіболіти; 4 – граніти, гранітогнейси дніпровського комплексу; 5 – граніти кіровоградського комплексу; 6 – розломи; 7 – скандієве зруденіння

Рідкіснометалічні ванадій-скандієві руди локалізовані в зонах завтовшки до десятків метрів, протяжністю до 1 км карбонатно-егіринових метасоматитів у породах палеопротерозойської скелюватської світи, поблизу контакту із гданцевською (доломіти, актинолітові і кварц-біотитові сланці, кварцити), представлені жильними і

гніздо-лінзоподібними тілами лужно-амфібол-акмітових метасоматитів з альбітом, апатитом, малаконом, тремолітом. Рудні поклади мають складну форму, невитримані параметри (до перших сотень метрів), представлені уран-рідкісноземельними і ванадій-скандієвими рудами (табл. 6).

Таблиця 6

Вміст скандію і супутніх компонентів у рудах Жовторіченського родовища (Тарханов и др., 1991)

Руди	Sc, г/т	V, г/т	P ₂ O ₅ %	TR ₂ O ₃ , г/т	Y, г/т	V ₂ O ₅ , г/т	Hf, г/т
Уран-рідкісноземельні	50–100	150–600	5,8	600–1000	20–500	1700	140
Ванадій-скандієві	100–200	50–120	2,6	400–500	100–250	2700	150
Змішані	100–150	100–200	3,4	500–600	150–250	2500	150

Рудоносні метасоматити складаються з альбіту 6–15 %, егірину 9–21 %, амфіболів (рибекіт, арфедсоніт, тремоліт, актиноліт) – 11–21 %, карбонатів – 21–46 %, кварцу – 6–26 %, тальку – 3–10 % та апатиту – 3–20 %. Руди характеризуються підвищеним вмістом малакону (до 1–2 %), який утворює окремі скупчення (Загнітко та ін., 2017). Середній вміст скандію в рудах – 0,072 % (ванадій-скандієві руди) та 0,042 % (змішані уран-рідкісноземельні руди). Головним концентратором скандію є егірин та лужні амфіболи. Крім скандію, у промислових концентраціях присутні (%) ванадій (0,036–0,54), ітрію (0,022–0,019), цирконій (1,1–1,2), рідкісні землі (0,036). По корінних рудах розвинені глинисті кори вивітрювання завтовшки до 40 м із середнім вмістом (%) скандію 0,01–0,013, цирконію – 0,88–1,4, ітрію – до 0,13,

відзначаються підвищені вмісти ітербію (до 0,013 %), лютецію та інших лантанодів.

У 1993 р. на базі комплексних скандій-ванадієвих і залізних руд було створено спільне українсько-барбадоське підприємство "Ashurst Technology Ltd.", розроблено технологію виробництва алюмо-скандієвого сплаву (лігатура з двопрцентним вмістом скандію), однак у 1995 р. через фінансові труднощі скандієву програму було припинено. Спеціальний дозвіл № 3670 на видобуток залізних руд мало ТОВ "Схід-Руда", яке здійснювало його в обмежених обсягах, але, судячи з документів, що є у відкритому доступі, термін дії цього дозволу закінчився 05.12.2015 р. (що потребує перевірки).

Відомості про запаси скандію є закритими, за оцінками західних експертів, загальні запаси руди на

родовищі становлять 7,4 млн т, скандію – 900 т за його середнім вмістом 105 г/т (Bernard, 2001). Ресурси скандію у корінних рудах досягають перших тисяч тонн, у коржах вивітрювання – 100 т.

Крім того, потенційним джерелом скандію в Україні можуть слугувати боксити Високопольського, Південнонікопольського, Смілянського родовищ; ільменіт-апатитові і титано-магнетитові руди Стремигородського і Торчинського родовищ; розсіпні ільменітові і рутил-циркон-ільменітові Малишевське, Іршанське, Злобицьке родовища; Первомайське і Ганнівське родовища залізистих кварцитів.

В Україні спеціальні дозволи на видобуток скандію як супутнього компонента видано на видобуток циркон-рутил-ільменітових розсіпів Тарасівського родовища в Київській області (ТОВ "Рутил-ільменітова компанія") та ільменіт-цирконових розсіпів родовища Валки-Гацьківське.

Германій в Україні пов'язаний переважно з вугленосними товщами Донецького і Львівсько-Волинського вугільних басейнів, де він присутній як супутній компонент. У Державному балансі запасів корисних копалин України обліковується 220 об'єктів із запасами 81,7 тис. т германію (*Мінеральні ресурси...*, 2020). Видобуток германію у 2019 р. сягав 92,2 т. Його виробництво було налагоджене на 13 коксохімічних заводах (Авдіївський, Алчевський, Баглейський, Донецький, Єнакіївський, Запорізький, Криворізький, Макіївський, Ясинуватський та ін.). На цих заводах діяли хімічні установки з попутного вилучення германію з надсмоляних вод коксування вугілля.

У **Донецькому басейні** вміст германію коливається від 0,3–1,3 г/т в антрацитах до 3,8–9,2 г/т в низькометаморфізованому вугіллі, але промислове значення має коксівне вугілля із середнім вмістом германію 3,8–6,8 г/т. Германій присутній у всіх шарах вугілля, однак найбільш германієносним є вугілля середнього карбону. Розподіл германію залежить від технологічних марок вугілля. У районах розвитку марок НПА, А (напівантрацит, антрацит) вміст Ge не перевищує 2–5 г/т золи; вугілля середніх і низьких стадій метаморфізму Д, Г, К, Ж (довгополум'яні, газові, коксові, жирні) – сягає 50–70 г/т золи і більше. Разом з германієм у вугіллі присутні інші елементи (в г/т золи): галій – 20–100, літій 50–400, берилій – 20–50.

Висновки. Як високоперспективні виділено такі об'єкти МСБ металічних корисних копалин України:

- **рідкісноземельні елементи:** родовища Новопопелівське (РЗЕ, Nb, Ta, P₂O₅), Мазурівське (РЗЕ, Zr, Nb), Азовське (РЗЕ, Zr), Анадолівське (РЗЕ); рудопрояви Петрово-Гнутівський (РЗЕ), Балка Корабельна (РЗЕ);
- **цирконій:** розсіпні родовища Малишевське (Ti, Zr), Тарасівське (Ti, Zr); корінне Яструбецьке (РЗЕ, Zr);
- **літій:** Шевченківське родовище сподуменових руд; Полохівське родовище петалітових руд; Станкуватське родовище сподумен-петалітових руд; прояв Крута Балка;
- **скандій:** Жовторіченське комплексне залізо-уран-ванадій-скандієве родовище;
- **германій:** вугілля Донецького басейну.

Ці родовища серед металічних корисних копалин України мають найвищий рівень інвестиційної привабливості, найнижчі ризики інвестиційних вкладень, характеризуються середнім рівнем конкуренції і можуть бути рекомендовані як першочергові об'єкти для інвестування в їх вивчення і промислове освоєння. Для визначення перспектив інвестування конкретних об'єктів потрібна попередня геолого-економічна оцінка доцільності та рентабельності їх промислового освоєння.

Високоперспективні об'єкти МСБ України неметалічних і горючих корисних копалин України будуть розглянуті в наступних статтях цієї серії.

Список використаних джерел

- Бакаржєв, А.Х., Макивчук, О.Ф., Иванов, Б.Н. и др. (2000). Мелкозернистые петалитовые руды – новый вид литийсодержащего минерального сырья Украины. *Мін. ресурси України*, 1, 16–19.
- Возняк, Д.К., Бугаєнко, В.М., Галабурда, Ю.А. та ін. (2000). Особливості мінерального складу та умов утворення рідкіснометалевих пегматитів західної частини Кіровоградського блоку (Український щит). *Мінералог. журнал*, 22, 1, 21–41.
- Гурський, Д.С., Єсипчук, К.Ю., Калінін, В.І. та ін. (2006). Металічні і неметалічні корисні копалини України. Том І. Металічні корисні копалини. Київ-Львів: Центр Європи, 785 с.
- Гурський, Д.С. (2008). Концептуальні засади державної мінерально-сировинної політики щодо використання стратегічно важливих для економіки країни корисних копалин. Львів: ЗУКЦ, 192 с.
- Донской, А.Н., Кулиш, Е.А., Донской Н.А. (2004). Нефелиновые породы Украины – комплексные алюминий-глиноземные и редкометалльные руды. К.: Логос, 222 с.
- Еременко, Г.К., Иванов, Б.Н., Белых, Н.А. и др. (1996). Минералогические особенности и условия образования литиевых пегматитов Кировоградского блока (Украинский щит). *Мінералог. журнал*, 18, 1, 48–57.
- Загнітко, В., Михайлов, В., Кривдік, С., Сидорчук, В. (2017). Генетичні особливості та ресурси рідкіснометалевих родовищ Українського щита. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (76), 58–65.
- Іванов, Б.Н., Лисенко, В.В., Макивчук, О.Ф. та ін. (2000). Екзоконтактні метасомати літєвих гранітних пегматитів Шполянсько-Ташлицького рідкіснометалевих рудного району. *Мін. ресурси України*, 4, 11–13.
- Інвестиційний атлас надрокористувача. Стратегічні та критичні мінерали (2021). Державна служба геології та надр України.
- Ісаков, Л.В., Бобров, О.Б. (2000). Літєносні пегматити Шевченківського пегматитового поля (Західне Приазов'я). *Мін. ресурси України*, 1, 23–30.
- Кривдік, С.Г., Загнітко, В.М., Стрекозов, С.М. та ін. (2000). Рідкіснометалеві сієніти Українського щита: перспективи пошуків багатих руд цирконію та лантаноїдів. *Мінералог. журнал*, 22, 1, 62–72.
- Мировой рынок скандия (2020). <https://xn--80aplem.xn--p1ai/analytiks/Mirovoj-rynok-skandia/>
- Мировые запасы скандия и перспектива их использования (2019). <http://dragomet.ru/wp-metally/mirovye-zapasy-skandiya-i-perspektiva-ih-ispolzovaniya.html>
- Михайлов, В.А., Кривдік, С.Г. (2004). Перспективи України щодо рідкісноземельних елементів у світовому аспекті. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 28, 10–12.
- Михайлов, В.А., Шевченко, В.І., Огар, В.В. та ін. (2007). Металічні корисні копалини України. Підручник. К.: ВПЦ "Київський університет", 463 с.
- Михайлов, В.А. (2010). Рідкоземельні руди мира. Геологія, ресурси, економіка. К.: ВПЦ "Київський університет", 223 с.
- Михайлов, В., Курило, М., Кошарна, С. (2021). Геолого-промислова оцінка та ранжування перспективних об'єктів вітчизняної бази рідкісноземельних елементів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2 (93), 32–40.
- Михайлов, В., Вижва, С., Паюк, С. (2022). Системний аналіз мінерально-сировинної бази стратегічних корисних копалин України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4, 36–44.
- Мінеральні ресурси України. Щорічник (2020). К.: ДВНП "Геоінформ України", 270 с. http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf
- Рудько, Г.І. Бала, Г.Р. (2021). Критична мінеральна сировина та її перспективи в Україні. *Мін. ресурси України*, 2, 3–14.
- Стрекозов, С.Н., Васильченко, В.В., Гурський, Д.С. и др. (1998). Геологическое строение и характер оруденения Азовского месторождения. *Мін. ресурси України*, 3, 6–9.
- Суярко, В.Г., Загнітко, В.М., Решетов, І.К. (2008). Рідкісноземельні елементи в гідротермальних мінералах та підземних водах Донбасу. *Вісник Харківського національного університету*, 804, 70–75.
- Тарханов, А.В., Кудлаев, А.Р., Петрин, А.В., Козирьков, В.Д. (1991). Желтоореченское ванадий-скандиевое месторождение. *Геология рудных месторождений*, 6, 50–56.
- Bernard, F. (2001). Scandium mineralization associated with hydrothermal lazulite-quartz veins in the Lower Austroalpine Grobgneis complex, Eastern Alps, Austria. Mineral Deposits at the Beginning of the 21st century. Liss (Netherlands): A.A. Balkema Publishers. P. 935–938.
- Melnikov, V.S., Kulchitska, A.A., Kryvdik, S.G., Gurskiy, D.S., Strekozov, S.N. (2000). The Azov Deposit – a New Type of Rare-metal Objects of Ukraine. *Miner. j.*, 22, № 5–6, 39–49.
- Mineral Commodity Summaries (2016–2021). Wash.: USGS. Electronic resource. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- Mykhailov, V.A., Hrinchenko, O.V., Malyuk, B.I. (2022). Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine. Geological Society, London, Special Publications. 2022-03-28, *Journal article*. DOI: 10.1144/SP526-2021-133
- Rare Earth. Minerals Yearbook. Metals and minerals Mineral commodity summaries. (2020). Vol. I. Wash.: USGS. P. 132–133.
- World Mining Data (2021). Volume 36. C. Reichl, M. Schatz. Mineral Production. Vienna, 266 p.

References

- Bakarchiev, A.H., Makivchuk, O.F., Ivanov, B.N. et al. (2000). Fine-grained petalite ores – a new type of lithium-bearing mineral raw materials in Ukraine. *Mineral Resources of Ukraine*, 1, 16–19. [In Russian]
- Vozniak, D.K., Bugaenko, V.M., Galaburda, Yu.A. et al. (2000). Features of mineral composition and conditions of formation of rare-metal pegmatites of the western part of Kirovograd Block (Ukrainian Shield). *Mineralogical Journal*, 22, 1, 21–41. [In Ukrainian]
- Gurskiy, D.S., Esipchuk, K.Yu., Kalinin, V.I. et al. (2006). Metallic and Non-Metallic Minerals of Ukraine. Vol. I. Metallic Minerals. Kyiv-Lviv: Center of Europe, 785 p. [In Ukrainian]
- Gurskiy, D.S. (2008). Conceptual Principles of the State Mineral Resources Policy on the Use of Strategically Important Minerals for the Country's Economy. Lviv: ZUKC, 192 p. [In Ukrainian]
- Donskoy, A.N., Kulish, E.A., Donskoy, N.A. (2004). Nepheline Rocks of Ukraine – Complex Aluminum-Alumina and Rare-Metal Ores. Kiev: Logos, 222 p. [In Russian]
- Eremenko, G.K., Ivanov, B.N., Belykh, N.A. et al. (1996). Mineralogical features and conditions of formation of lithium pegmatites of Kirovograd Block (Ukrainian Shield). *Mineralogical Journal*, 18, 1, 48–57. [In Russian]
- Zagnitko, V., Mykhailov, V., Kryvdyk, S., Sydorchuk, V. (2017). Genetic features and resources of rare-metal deposits of Ukrainian Shield. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (76), 58–65. [In Ukrainian]
- Ivanov, B.N., Lysenko, V.V., Makivchuk, O.F. et al. (2000). Exocontact metasomatites of lithium granite pegmatites of Shpolyano-Tashlytske rare-metal ore field. *Mineral Resources of Ukraine*, 4, 11–13. [In Ukrainian]
- Investment Atlas of Subsurface User. Strategic and Critical Minerals. (2021). Kyiv: State Service of Geology and Subsoil of Ukraine. <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/en/investmentopportunities-in-exploration-production-strategic-and-critical-minerals.pdf> (accessed 15.12.22).
- Isakov, L.V., Bobrov, O.B. (2000). Lithium-bearing pegmatites of Shevchenkivske pegmatite field (Western Pryazovya). *Mineral Resources of Ukraine*, 1, 3–30. [In Ukrainian]
- Kryvdik, S.G., Zagnitko, V.M., Strekozov, S.N. et al. (2000). Rare metal syenites of the Ukrainian shield: prospects for searching for rich zirconium and lanthanide ores. *Mineralogical Journal*, 22, 1, 62–72. [In Ukrainian]
- World scandium market (2020). <https://xn--80aple.xn--p1ai/analytiks/Mirovoj-rynok-skandia/>
- World scandium reserves and the prospect of their use (2019). <http://dragomet.ru/wp-metally/mirovye-zapasy-skandiya-i-perspektiva-ihispolzovaniya.html> (accessed 15.12.22) [In Russian]
- Mykhailov, V.A., Kryvdyk, S.G. (2004). Prospects of Ukraine in relation to rare-earth elements in the world aspect. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 28, 10–12. [In Ukrainian]
- Mykhailov, V.A., Shevchenko, V.I., Ogar, V.V. et al. (2007). Metallic Minerals of Ukraine. Textbook. Kyiv University Publishing, 463 p. [In Ukrainian]
- Mykhailov, V.A. (2010). Rare-Earth Ores of the World. Geology, Resources, Economics. Kyiv University Publishing, 223 p. [In Russian]
- Mykhailov, V., Kurylo, M., Kosharna, S. (2021). Geological and industrial assessment and ranking of promising objects of the domestic base of rare-earth elements. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (93), 32–40. [In Ukrainian]
- Mykhailov V., Vyzhva S., Paiuk, S. (2022). System analysis of the mineral-raw material base of strategic minerals of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4, 36–44. [In Ukrainian]
- Mineral resources of Ukraine. (2020). Kyiv: SRDE "Geoinform of Ukraine", 271 p. http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf (accessed 15.12.22) [In Ukrainian]
- Rudko, G.I., Bala, G.R. (2021). Critical Mineral Raw Materials and Their Prospects in Ukraine. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 3–14. [In Ukrainian]
- Strekozov, S.N., Vasilchenko, V.V., Gurskiy, D.S. et al. (1998). Geological structure and nature of mineralization of Azovske deposit. *Mineral Resources of Ukraine*, 3, 6–9. [In Ukrainian]
- Suyarko, V.G., Zagnitko, V.M., Reshetov, I.K. (2008). Rare earth elements in hydrothermal minerals and groundwater of Donbas. *Bulletin of Kharkiv National University*, 804, 70–75. [In Ukrainian]
- Tarkhanov, A.V., Kudlaev, A.R., Petrin, A.V., Kozirkov, V.D. (1991). Zheltorechenskoe vanadium-scandium deposit. *Geology of Ore Deposits*, 6, 50–56. [In Russian]
- Bernard, F. (2001). Scandium mineralization associated with hydrothermal lazulite-quartz veins in the Lower Austroalpine Grobgneis complex, Eastern Alps, Austria. Mineral Deposits at the Beginning of the 21st century. Liss (Netherlands): A.A. Balkema Publishers. P. 935–938.
- Melnikov, V.S., Kulchitska, A.A., Kryvdik, S.G., Gurskiy, D.S., Strekozov, S.N. (2000). The Azov Deposit – a New Type of Rare-metal Objects of Ukraine. *Miner. j.*, 22, № 5–6, 39–49.
- Mineral Commodity Summaries (2016–2021). Wash.: USGS. Electronic resource. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- Mykhailov, V.A., Hrinchenko, O.V., Malyuk, B.I. (2022). Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine. Geological Society, London, Special Publications. 2022-03-28. *Journal article*. DOI: 10.1144/SP526-2021-133
- Rare Earth. Minerals Yearbook. Metals and minerals Mineral commodity summaries. (2020). Vol. I. Wash.: USGS. P. 132–133.
- World Mining Data (2021). Volume 36. C. Reichl, M. Schatz. Mineral Production. Vienna, 266 p.

Надійшла до редколегії 28.12.22

V. Mykhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vladvam@gmail.com,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

HIGHLY PROSPECTIVE OBJECTS OF THE MINERAL AND RAW MATERIAL BASE OF UKRAINE. PART 1. METALLIC MINERALS

A short description of the highly promising mineral and raw material base of metallic minerals of Ukraine is provided. It includes the following deposits and occurrences: complex carbonatite rare metal-apatite Novopoltavske deposit (REE, Nb, Ta, P₂O₅); complex zirconium-rare-earth-niobium Mazurivske (Oktyabske) deposit (REE, Zr, Nb); complex rare earth-zirconium Azovske deposit (REE, Zr); Anadol'ske rare earth deposit (REE); rare earth occurrences Petrovo-Hnutivske (RZE) and Balka Korabelna (RZE); placer complex ilmenite-zirconium deposits Malyshevske (Ti, Zr) and Tarasivske (Ti, Zr); indigenous complex rare-earth-zirconium Yastrubetske deposit (REE, Zr); Shevchenkivske deposit of spodumene ores (Li); Polokhivske deposit of petalite ores (Li); Stankuvatske deposit of spodumene-petalite ores (Li); manifestation of Kruta Balka (Li); Zhovtorichenske complex iron-uranium-vanadium-scandium deposit (Sc, Fe, U, V); coal of the Donetsk basin (Ge). Among the metallic minerals of Ukraine, these deposits have the highest level of investment attractiveness, the lowest investment risks, are characterized by an average level of competition and can be recommended as priority objects for investment in their study and industrial development. To determine the investment prospects of specific objects, a preliminary geological and economic assessment of the feasibility and profitability of their industrial development is necessary.

Keywords: mineral base, deposit, strategic minerals, investment attractiveness.

УДК 553.042

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.10>

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: vyzhvas@gmail.com;

М. Курило, д-р геол. наук, доц.,

E-mail: kurilo@univ.kiev.ua;

І. Віршило, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: ivirshylo@gmail.com;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

РЕГІОНАЛЬНІ МІНЕРАЛЬНО-СИРОВИННІ БАЗИ – КЛЮЧОВИЙ ФАКТОР У ВІДБУДОВІ УКРАЇНИ У ВОЄННИЙ І ПОВОЄННИЙ ПЕРІОДИ

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

Проведено аналіз регіональних складових мінерально-сировинної бази України, визначено її структуру. Проведено аналіз областей і регіонів за рядом базових ознак: інтенсивністю надрокористування, ступенем геологічного вивчення родовищ, ступенем промислового освоєння розвіданих запасів корисних копалин, за наявністю стратегічно важливих корисних копалин. Визначено, що головним недоліком окремих регіональних складових мінерально-сировинної бази є нерівномірний розподіл запасів і прогнозних ресурсів, а також асиметричний розподіл споживачів мінеральної сировини. Наведені результати свідчать про істотні відмінності у структурі мінерально-сировинної бази окремих областей. Кількості родовищ корисних копалин та об'єктів обліку змінюється в значних межах – від ≈ 100 до ≈ 700 , а родовищ, які експлуатуються, – від 35 до ≈ 300 . Середні значення цих показників по Україні становлять 348 та 130 об'єктів. Середній показник залучених у промислове освоєння об'єктів по областях сягає 37 %. Проаналізовано зміни в регіональній структурі мінерально-сировинної бази України та визначено напрями їхньої оптимізації задля досягнення збалансованих показників освоєння. Для своєчасного і безперервного забезпечення регіонів будівельними матеріалами і паливними ресурсами необхідна актуальна переоцінка регіональних мінерально-сировинних баз із врахуванням збитків і порушень, які виникли в результаті військових дій, і з проведенням оцінки сучасних потреб і можливостей порушеної інфраструктури.

Ключові слова: мінерально-сировинна база, регіональна структура, ресурси, розподіл.

Актуальність дослідження. Розвиток і відтворення мінерально-сировинної бази (МСБ) України на національному рівні неможливий без реалізації процесів відтворення на регіональному і локальному рівнях. Для рівнів окремих регіонів існує багато специфічних передумов розвитку МСБ, які пов'язані з наявністю і структурою виробництва мінеральної сировини та її споживання, особливо паливно-енергетичних корисних копалин та сировини для будівельної індустрії. Відтворення мінерально-сировинної бази в національному, регіональному та локальному масштабі є тривалим процесом, який вимагає кількох років для введення в експлуатацію навіть невеликого родовища будівельної сировини, починаючи з його розвідки. Темпи і структура приросту мінерально-сировинної бази повинні відповідати темпам її погашення і темпам промислового виробництва, які є відмінними по окремих регіонах.

Розвиток окремих регіонів України ускладнений нерівномірним розподілом мінеральних ресурсів, а також особливостями розподілу підприємств-споживачів мінеральної сировини. Для своєчасного і безперервного забезпечення регіонів будівельними матеріалами і паливними ресурсами необхідна актуальна переоцінка регіональних мінерально-сировинних баз із врахуванням збитків і порушень, які виникли в результаті військових дій, і з проведенням оцінки сучасних потреб і можливостей порушеної інфраструктури. Згідно з аналізом канадської компанії "SecDev", яка провела оцінку геополітичних ризиків після початку війни в Україні, тимчасово втрачено доступ або зруйновано 63 % вугільних родовищ, 11 % нафтових та 20 % газових родовищ, 42 % родовищ металічних корисних копалин, 33 % – рідкісноземельних руд, у тому числі літію (Anthony, Dalton, 2022). Отже, проблеми розвитку і відтворення регіональних складових МСБ, які були завжди актуальними у напрямі досягнення цілей сталого розвитку, на сьогодні загострилися і перетворилися на окремі складові ризику ускладнення відбудови України в воєнний і післявоєнний період через відсутність або ускладнений доступ до частини мінеральних ресурсів.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У даному дослідженні розглядаються напрями відтворення та розвитку мінерально-сировинної бази з акцентом на відтворенні саме регіональних складових. Саме такий напрям є більш актуалізованим і реалістичним порівняно із традиційним підходом оцінки МСБ у національному масштабі без врахування регіональних особливостей видобутку і потреб споживання. Оцінка регіональних складових МСБ у даному дослідженні базується на визначенні актуальних темпів використання мінеральних ресурсів відповідно до наявних у регіоні промислових підприємств, у тому числі надрокористування, визначенні дефіцитних видів корисних копалин для регіонів та розробки напрямів їх забезпечення в найближчі періоди.

Подальше практичне використання і вдосконалення результатів дослідження передбачено на таких рівнях:

- **на локальному рівні підприємств** – у галузі надрокористування та усіма промисловими підприємствами, які є безпосередніми споживачами мінеральної сировини, для управління і прогнозування забезпеченості ресурсами та вчасного укладання договорів на постачання;

- **на регіональному рівні** – використання органами місцевого самоврядування (обласними, районними та селищними адміністраціями) для управління ресурсами території, здійснення моніторингу та контрольних функцій, передбачених Кодексом про надра;

- **на національному рівні** – використання підприємствами та установами Міністерства екології України, Державної служби геології та надр, Міністерства розвитку громад та територій України, Міністерства інфраструктури.

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

На загальнодержавному рівні для розв'язання вищезазначених проблем було затверджено Загальнодержавну

Вижва С., Курило М., Віршило І., 2023

програму розвитку мінерально-сировинної бази до 2030 року (*Загальнодержавна програма...*, 2011), але за основу документа було взято виконання стратегічних загальнодержавних питань у сфері геологічного вивчення та використання надр без відображення регіонального аспекта розвитку МСБ. Даний документ у базових підходах і оцінках подібний до такої ж Програми до 2010 року (*Загальнодержавна програма...*, 2006) і жодним чином не відображає збитки, руйнування і відсутність доступу до ресурсів, які виникли для об'єктів надрокористування з початком військових дій після 2014 року.

Регіональний рівень розвитку МСБ передбачає розроблення й затвердження регіональних програм розвитку МСБ, що належить до компетенції обласних, Київської та Севастопольської рад відповідно до чинного законодавства (*Кодекс...*, 1994). Ці норми законодавства не є такими, що зобов'язують обласні ради звітувати про розроблення й упровадження таких програм розвитку, а крім того, не визначено джерела фінансування таких дій, що призводить або до низького рівня підготовки регіональних програм розвитку МСБ, або ще частіше – до їх відсутності.

Регіональні аспекти розвитку та відтворення мінерально-сировинних баз були вперше проаналізовані в опублікованих наукових працях (*Довгий та ін.*, 2014; *Вижева та ін.*, 2018a, b; *Балега та ін.*, 2018).

За час військових дій для багатьох регіонів виник дефіцит певних видів мінеральної сировини, які особливо потрібні для відбудови, реконструкції або нового будівництва зруйнованих об'єктів. Отже, ключовим питанням, з яким пов'язане дане дослідження і його новизна, є регіональний і місцевий аспект відтворення мінерально-сировинної бази областей та територій. Практична цінність очікуваних результатів полягає у зменшенні дефіциту мінеральної сировини, яка є критичною для відбудови регіонів найбільш постраждалих внаслідок військових дій 2022–2023 рр.

Формулювання цілей статті. Базовим завданням проведеного дослідження є оцінка регіональних мінерально-сировинних баз з врахуванням особливостей регіонального розподілу запасів і ресурсів корисних копалин, встановлення груп дефіцитних видів корисних копалин, класифікація регіонів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У перелічених вище документах (*Загальнодержавна програма...*, 2006, 2011) визначено, що структура мінерально-сировинної бази промислових регіонів України за ступенем геологічного вивчення та підготовленості родовищ до промислового освоєння в цілому сприятлива і свідчить про можливість забезпечення потреб промисловості щодо базових видів мінеральної сировини на віддалену перспективу. Водночас загальновідомим є дефіцит таких видів корисних копалин, як природний газ, нафта, благородні, рідкісні та кольорові метали, алмази, ванадій, вольфрам, молибден, літій, барит, апатити, фосфорити та ін. Це характеристика вітчизняної МСБ у державному масштабі, але існують диспропорції у структурі МСБ і дефіцити окремих видів корисних копалин як на регіональному, так і місцевому рівнях.

Відповідно до статистичного опрацювання та аналізу інформації з опублікованих та довідкових джерел (*Мінеральні ресурси, 2010-2019; Геоінформ, 2022; Укргеологстром, 2018, Державна служба, 2023* та ін.) у даному дослідженні проаналізовано показники, які характеризують структуру МСБ окремих областей. Опрацьовувались такі показники регіонального масштабу:

1. Загальна кількість родовищ, які обліковуються, у тому числі окремі об'єкти обліку.
2. Кількість родовищ, які залучені в експлуатацію.
3. Кількість родовищ за видами корисних копалин, у тому числі такі, що експлуатуються.
4. Розвідані запаси промислових категорій за видами корисних копалин (A+B+C₁ та C₂ за умов складної геологічної будови).
5. Кількість видів корисних копалин, які обліковуються в регіоні.
6. Обсяги видобутку за окремими видами корисних копалин.

У результаті були розраховані такі показники, як частка сировинної бази окремих видів корисних копалин у загальних показниках МСБ регіону; частка залучених у промислове освоєння об'єктів; частка видобутку регіону у загальних показниках видобутку по Україні та інші. На рис. 1 проілюстровано нерівномірність розподілу загальної кількості родовищ корисних копалин.

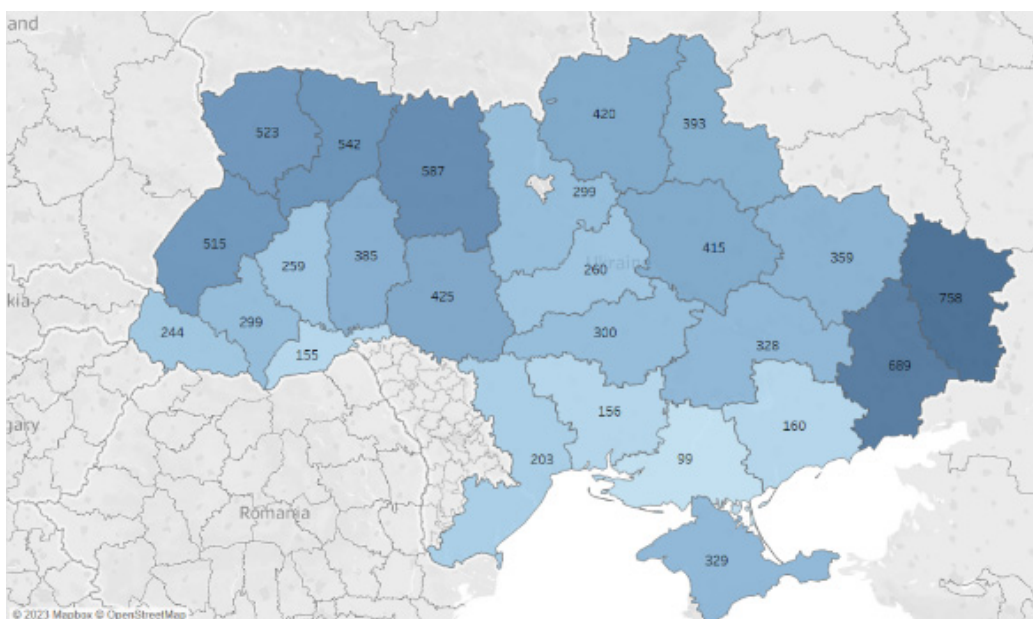


Рис. 1. Розподіл кількості родовищ корисних копалин, які обліковуються, по адміністративних областях

Названі нерівномірності розподілу запасів і ресурсів корисних копалин у подальшому загострюються при розподілі об'єктів надрокористування: група регіонів з достатньо високою активністю виконання робіт з надрокористування (150–300 спеціальних дозволів: Луганська, Львівська, Донецька, Полтавська, Житомирська, Харківська області); група регіонів із середньою активністю (100–149 спеціальних дозволів: Івано-Франківська, Закарпатська, АР Крим, Вінницька, Хмельницька, Тернопільська, Рівненська, Дніпропетровська, Київська області); група регіонів з помірною активністю (99–50 спеціальних дозволів: Сумська, Чернівецька, Кіровоградська, Запорізька, Черкаська, Херсонська, Волинська, Чернігівська області); група регіонів з низькою активністю (49–1 спеціальний дозвіл: Миколаївська, Одеська області, м. Київ, шельф Чорного моря, шельф Азовського моря, м. Севастополь).

За ступенем промислового освоєння наявних розвіданих запасів корисних копалин серед областей виділяються група з показниками, нижчими за середній рівень (частка залучених у промислове освоєння об'єктів складає 20–30 %), група із середніми показниками (30–40 %) та група із масштабним залученням розвіданих запасів у розробку з показником, що перевищує 40 %.

Відповідно по групах належність регіонів є такою:

1 група (20–30 %): Вінницька, Волинська, Кіровоградська, Миколаївська, Рівненська;

2 група (30–40 %): Запорізька, Івано-Франківська, Київська, Львівська, Одеська, Тернопільська, Херсонська, Харківська, Хмельницька, Черкаська, Чернівецька;

3 група (понад 40 %): АР Крим, Дніпропетровська, Донецька, Закарпатська, Полтавська, Житомирська, Сумська, Чернігівська.

Розподіл кількості родовищ залучених у промислове освоєння об'єктів по областях наведено на рис. 2.

За кількістю видів корисних копалин, які обліковуються (за розвіданими запасами), виділяються група з обмеженою кількістю (10–20 видів: Вінницька, Волинська, Київська, Рівненська, Тернопільська, Херсонська, Черкаська, Чернігівська, Чернівецька області); група із середніми показниками (20–30 видів: Закарпатська, Запорізька, Івано-Франківська, Сумська, Хмельницька області) та група областей із значно більшим різноманіттям корисних копалин (понад 30 видів: АР Крим, Дніпропетровська, Донецька, Закарпатська, Полтавська, Житомирська, Кіровоградська, Одеська, Харківська області).

Типові структури МСБ областей по окремих групах наведено на рис. 2–5.

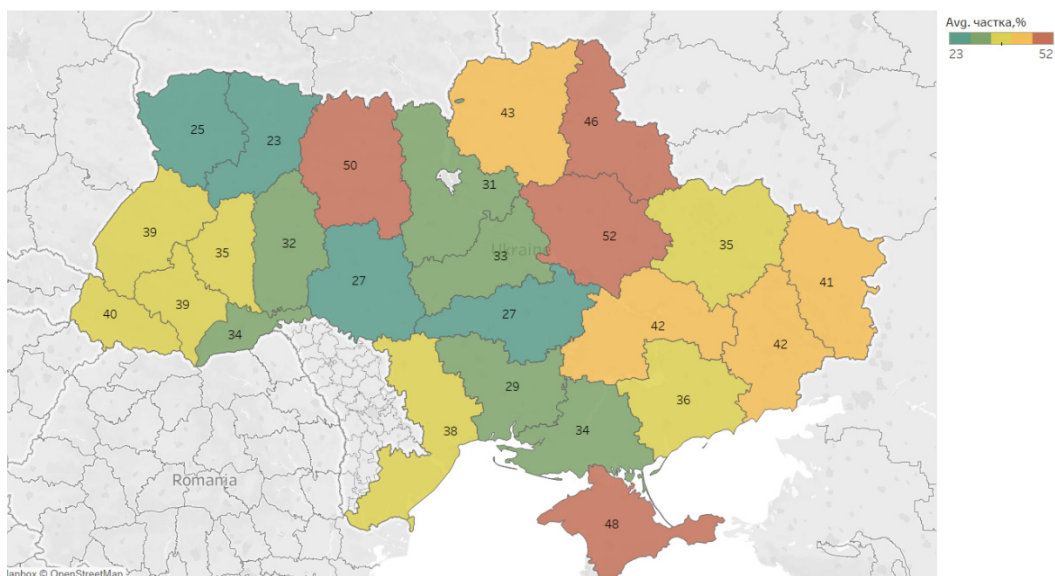


Рис. 2. Розподіл кількості родовищ, залучених у промислове освоєння об'єктів по областях

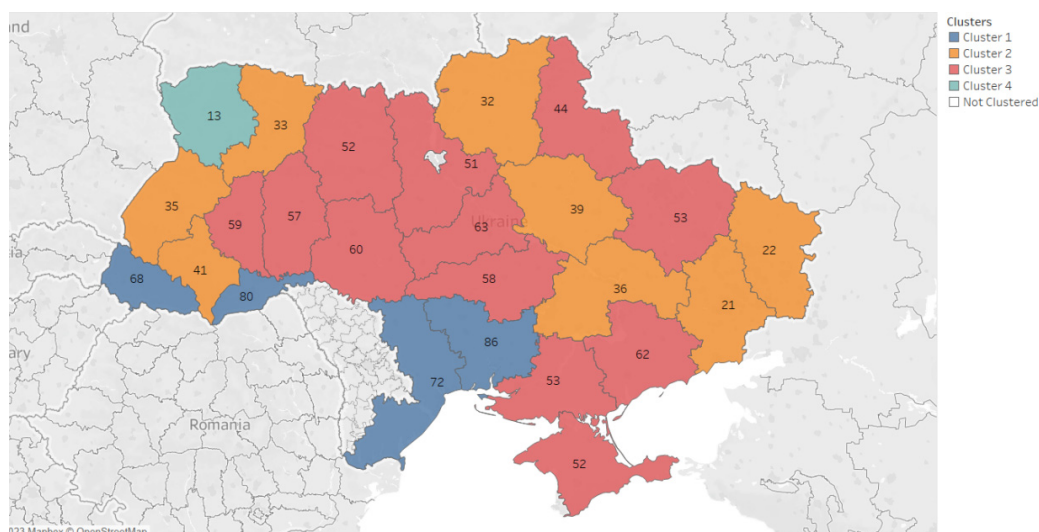


Рис. 3. Розподіл середньої кількості родовищ будівельної сировини по регіонах

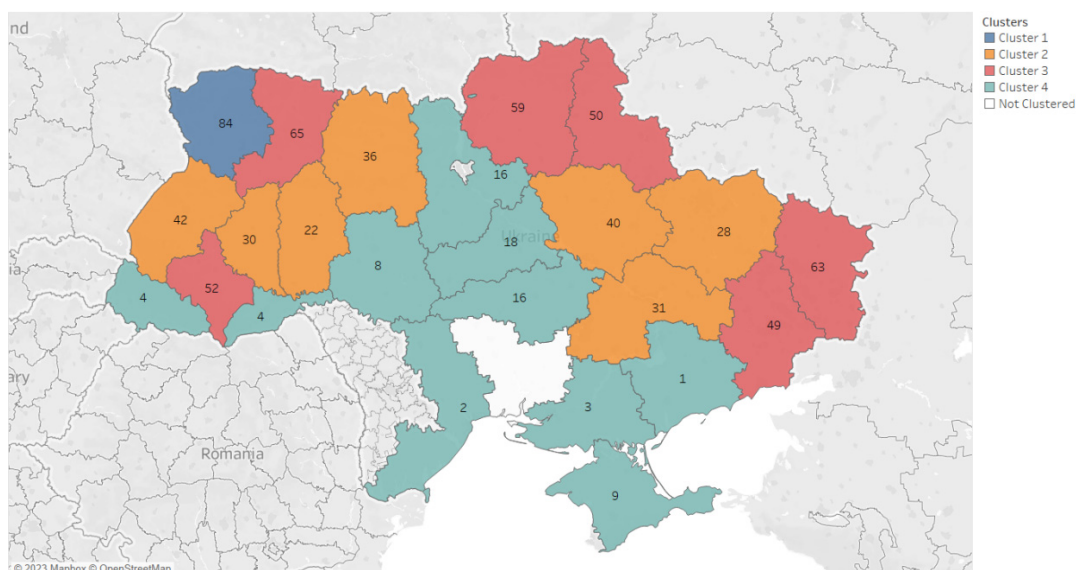


Рис. 4. Розподіл середньої кількості родовищ паливно-енергетичної сировини по регіонах

За результатами статистичного аналізу серед адміністративних областей віділено такі групи за особливостями структури регіональної МСБ за видами корисних копалин:

- регіони із значною перевагою корисних копалини паливно-енергетичного комплексу, в т. ч. твердих корисних копалин;
- регіони із значною перевагою корисних копалини для виробництва будівельних матеріалів;
- регіони з рівномірним розподілом окремих груп корисних копалин.

У таблиці 1 наведено розподіл областей по названих групах із доповненням особливостей структури регіональної МСБ, що відображає додаткові особливості виділених груп і підгруп.

Наведені результати свідчать про істотні відмінності у структурі мінерально-сировинної бази окремих областей. Кількості родовищ корисних копалин та об'єктів обліку змінюється в значних межах – від ≈ 100 до ≈ 700 , а родовищ, які експлуатуються, – від 35 до ≈ 300 . Середні значення цих показників по Україні становлять 348 та 130 об'єктів відповідно. Середній показник залучених у промислове освоєння об'єктів по областях сягає 37 %.

Така характеристика, як структура розвіданих запасів по видах корисних копалин та величина і якість запасів, зумовлені передусім геологічними передумовами розвитку території, але такі характеристики МСБ, як ступінь залучення в експлуатацію і темпи відтворення МСБ по головних напрямках, залежать і від систем господарювання, які функціонують у відповідних регіонах.

Таблиця 1

Класифікація областей за особливостями структури МСБ (по групах корисних копалин)

Група	Характеристика підгрупи	Назви областей
1. Регіони із значною перевагою корисних копалини паливно-енергетичного комплексу	1.1. Виключна перевага корисних копалини паливно-енергетичного комплексу	Волинська
	1.2. Істотна частка корисних копалин для виробництва будівельних матеріалів	Луганська, Рівненська, Сумська, Чернігівська
	1.3. Наявність інших видів корисних копалин стратегічного значення	Донецька, Івано-Франківська, Львівська
2. Група із значною перевагою корисних копалини для виробництва будівельних матеріалів	2.1. Виключна перевага корисних копалини для виробництва будівельних матеріалів	Вінницька, Миколаївська, Одеська, Чернівецька
	2.2. Істотна частка корисних копалин паливно-енергетичного комплексу	Тернопільська, Харківська, Хмельницька, Черкаська
	2.3. Наявність інших видів корисних копалин стратегічного значення	АРК, Закарпатська, Запорізька, Житомирська, Кіровоградська, Херсонська
3. Група – із рівномірним розподілом окремих груп корисних копалин		Полтавська, Дніпропетровська

- Корисні копалини паливно-енергетичного комплексу
- Гірничохімічні корисні копалини
- Корисні копалини для виробництва будівельних матеріалів
- Води питні та технічні, мінеральні та термальні

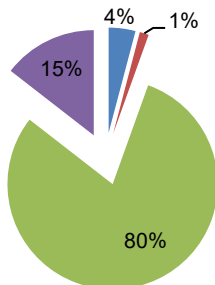


Рис. 5а. Типова структура МСБ областей із виключною перевагою корисних копалин для виробництва будівельних матеріалів

- Корисні копалини паливно-енергетичного комплексу
- Руди чорних і кольорових металів
- Корисні копалини для виробництва будівельних матеріалів
- Води питні та технічні, мінеральні та термальні

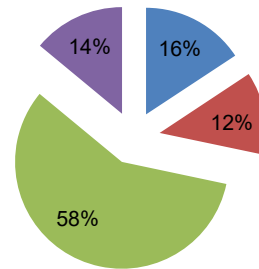


Рис. 5б. Типова структура МСБ областей із перевагою корисних копалин для виробництва будівельних матеріалів і наявністю інших видів корисних копалин стратегічного значення

- Корисні копалини паливно-енергетичного комплексу
- Корисні копалини для виробництва будівельних матеріалів
- Води питні та технічні, мінеральні та термальні

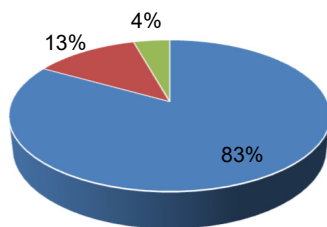


Рис. 5в. Типова структура МСБ областей із виключною перевагою корисних копалин паливно-енергетичного комплексу

- Корисні копалини паливно-енергетичного комплексу
- Руди чорних і кольорових металів
- Корисні копалини для виробництва будівельних матеріалів
- Води питні та технічні, мінеральні та термальні

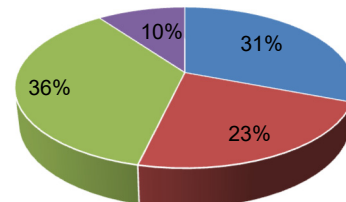


Рис. 5г. Типова структура МСБ областей із рівномірним розподілом окремих груп корисних копалин

- Корисні копалини паливно-енергетичного комплексу
- Руди чорних і кольорових металів
- Гірничохімічні корисні копалини
- Корисні копалини для виробництва будівельних матеріалів
- Нерудні корисні копалини для металургії
- Води питні та технічні, мінеральні та термальні

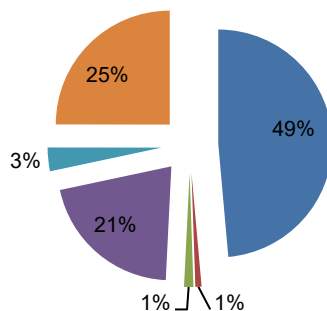


Рис. 5д. Типова структура МСБ областей із перевагою корисних копалин паливно-енергетичного комплексу і наявністю інших видів корисних копалин стратегічного значення

Висновки. Відповідно до виявлених недоліків у структурі регіональних МСБ можна визначити головні напрями їхньої оптимізації для досягнення збалансованих показників освоєння:

- створення бази обліку та зберігання геологічної інформації регіонального рівня, яка забезпечить вирішення оперативних завдань місцевого рівня;
- визначення темпів видобутку й використання окремих видів корисних копалин, їхніх втрат, терміну забезпеченості розвіданими запасами;

- визначення пріоритетних напрямів розвитку місцевих мінерально-сировинних комплексів, які передусім стосуються таких напрямів відповідно до виділених вище груп. А саме:

Для першої групи регіонів із значною перевагою корисних копалин паливно-енергетичного комплексу:

- забезпечення бази мінеральної сировини для виробництва будівельних матеріалів;
- забезпечення бази мінеральної сировини для сільського господарства;
- забезпечення районів питною підземною водою.

Для другої групи із значною перевагою корисних копалин для виробництва будівельних матеріалів:

- забезпечення геологічного вивчення та промислової оцінки родовищ корисних копалин, які є дефіцитними для даного району (паливно-енергетичних, рудних і нерудних);
- визначення шляхів забезпечення потреб за рахунок родовищ інших районів і областей із обґрунтуванням конкретних родовищ і об'єктів обліку.

Для третьої групи з рівномірним розподілом окремих груп корисних копалин:

- забезпечення геологічного вивчення та промислової оцінки родовищ корисних копалин стратегічного значення;
- геолого-екологічний моніторинг територій із реалізацією необхідних заходів екологічної рекультиваци відпрацьованих об'єктів.

Наступними кроками досліджень у цьому напрямі передбачено оцінку існуючого стану регіональних МСБ із врахуванням нанесених збитків об'єктам надрокористування і інфраструктури в межах регіонів, які станом на 1.01.2023 р. є окупованими, деокупованими, а також ті, що перебувають у зоні ризику бойових дій, та інших регіонів, що перебувають у зоні ризику непрямих втрат або руйнувань унаслідок ракетних ударів.

Список використаних джерел

- Балега, А., Вижва, С., Курило, М. (2018). Інституційне забезпечення геологічного вивчення надр: національний вимір (практика) та міжнародний досвід. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(83), 63–72.
- Вижва, С., Курило, М., Балега, А. (2018a). Основні інструменти державного планування і фінансування забезпечення геологічного вивчення надр в Україні. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(81), 56–62.
- Вижва, С.А., Курило, М.М., Балега, А.В. (2018b). Регіональні аспекти розвитку й відтворення вітчизняної мінерально-сировинної бази та способи їхнього фінансового забезпечення. *Мінеральні ресурси України*, (4), 12–17.
- Державна служба геології та надр України. Офіційний сайт. (2023). <http://www.geo.gov.ua/>
- Державне науково-виробниче підприємство "Геоінформ України". Офіційний сайт. (2022). <http://geoinf.kiev.ua/specdozvoli>
- Довгий, С.О., Іванченко, В.В., Коржнев, М.М. та ін. (2014). Мінерально-сировинна комплекс та сталий розвиток України. Монографія НАН України, Інститут телекомунікацій і глобал. інформ. Простору, 233 с.

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: s.vyzhva@knu.ua;
M. Kurylo, Dr. Sci. (Geol.), Associate Prof.,
E-mail: kurilo@univ.kiev.ua;
I. Virshilo, PhD (Geol.), Associate Prof.,
E-mail: ivirshylo@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

REGIONAL MINERAL AND RAW MATERIAL BASES AS A KEY FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF UKRAINE DURING THE WAR AND POST-WAR PERIODS

In the study, an analysis of the regional components of the mineral and raw material base of Ukraine was carried out, and its structure was determined. Regions were analyzed according to a number of basic characteristics: the intensity of subsoil use, minerals production, the level of geological study, the level of industrial development of explored mineral reserves, and the presence of strategically important minerals. It was determined that the main disadvantage of individual regional components of the mineral raw material base is the uneven distribution of reserves and inferred resources, as well as the asymmetric distribution of consumers of mineral raw materials. The changes in the regional structure of the mineral and raw material base of Ukraine were analyzed and directions for their optimization were determined in order to achieve balanced indicators of development. The results indicate significant differences in the structure of the mineral base of individual regions. The number of mineral deposits varies significantly – from ≈100 to ≈700, exploited deposits – from 35 to ≈300. The average values of these indicators in Ukraine are 348 and 130 objects. The average rate of objects involved in industrial development by region is 37%. Characteristics such as the structure of explored reserves by type of minerals and the size and quality of reserves are determined. In order to provide the regions with construction materials and fuel resources in a timely and continuous manner, an up-to-date reassessment of the regional mineral and raw material bases is necessary, taking into account the damages and violations that occurred as a result of military operations, and with the assessment of modern needs and opportunities of the damaged infrastructure.

Keywords: mineral and raw material base, regional structure, resources, distribution.

Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2010 року. (2006). Закон України № 3458. <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/3458-15>

Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року. (2011). Закон України № 3268-VI. <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/3268-17>.

Кодекс України про надра. (1994). <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132/94-%D0%B2%D1%80>

Мінеральні ресурси України. (2010-2019). К.: ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України". <http://geoinf.kiev.ua>.

ТОВ НВП Укргеологстром. Офіційний сайт. (2013). <http://ukrgeology.com.ua/>
Anthony, F., Dalton, B. (2022). In the Ukraine war, a battle for the nation's mineral and energy wealth. Ukraine risks losing vast mineral resources to Russian occupation. *The Washington Post*, 10 Aug. 2022

References

- Anthony, F., Dalton, B. (2022). In the Ukraine war, a battle for the nation's mineral and energy wealth. Ukraine risks losing vast mineral resources to Russian occupation. *The Washington Post*, 10 Aug. 2022
- Balega, A., Vyzhva, S., Kurylo, M. (2018). Institutional support of geological study of the subsurface: national dimension (practice) and international experience. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(83), 63–72. [in Ukrainian]
- Dovgii, S.O., Ivanchenko, V.V., Korzhnev, M.M. et al. (Eds.). (2014). Mineral and raw material complex and sustainable development of Ukraine. Monograph of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Telecommunications and Global. information space, 233 p. [in Ukrainian]
- LLC Ukrgeologstrom. The official website. (2018). <http://ukrgeology.com.ua/> [in Ukrainian]
- Mineral resources of Ukraine. (2010-2019). K.: SSPE "Geoinform of Ukraine". <http://geoinf.kiev.ua> [in Ukrainian]
- State Geology and Subsoil Service of Ukraine. The official site. (2023) <http://www.geo.gov.ua/> [in Ukrainian]
- State scientific and production enterprise "Geoinform of Ukraine". The official site. (2022) <http://geoinf.kiev.ua/specdozvoli> [in Ukrainian]
- Subsoil Code of Ukraine. (1994). Law of Ukraine № 132/94. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132/94-%D0%B2%D1%80> [in Ukrainian]
- The National program of development of mineral base of Ukraine for period to 2030. (2011). Law of Ukraine № 3268-VI. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#Text> [in Ukrainian]
- The National program of development of mineral base of Ukraine for period to 2010. (2006). Law of Ukraine № 3458. <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/3458-15> [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Kurylo, M., Balega, A. (2018a). The main tools of state planning and funding for geological study of the subsurface in Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(81), 56–62.
- Vyzhva, S.A., Kurylo, M.M., Balega, A.V. (2018b). Regional aspects of the development and renewing of the domestic mineral and raw material base and methods of their financial support. *Mineral resources of Ukraine*, (4), 12–17.

Надійшла до редколегії 13.01.23

УДК 551.243:553.98.041(477.65+477.53)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.11>

І. Багрій, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: bagrid@ukr.net,
Інститут геологічних наук НАН України,
вул. О. Гончара, 55-Б, м. Київ, 01054, Україна;
І. Гафич, канд. геол.-мінералог. наук, директор,
E-mail: gafichip@dtok.com,
ДТЕК Нафтогаз, вул. Сім'ї Хохлових, 9-Д, м. Київ, 04119, Україна;
С. Паюк, голова,
E-mail: golova@dkz.gov.ua,
Державна комісія України по запасах корисних копалин,
вул. Ген. Алмазова (Кутузова), 18/7, кімн. 816, м. Київ, 01133, Україна;
Є. Солодкий, канд. геол. наук, керівник департаменту,
E-mail: solodkiyev@dtok.com,
ДТЕК Нафтогаз, вул. Сім'ї Хохлових, 9-Д, м. Київ, 04119, Україна;
К. Ярошовець-Баранова, асп.,
E-mail: katerina.yaroshovetseo_33@ukr.net,
Інститут геологічних наук НАН України,
вул. О. Гончара, 55-Б, м. Київ, 01054, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ВИДОБУТКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ В АСТРОБЛЕМАХ УКРАЇНИ

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

Проаналізовано результати комплексних досліджень будови та перспектив нафтогазоносності імпактних структур (астроBLEM) України на основі впровадження новітніх технологій та апаратурних комплексів. В основу роботи покладено фактичний матеріал багаторічних експедиційних досліджень, виконаних за методикою структурно-термо-атмо-гідролого-геохімічних досліджень (СТАГГД) імпактних структур. Технологію впроваджено при вирішенні практичних питань пошуків корисних копалин (вуглеводнів) та екологічних проблем у різних районах України (на суходолі та в акваторії морів).

Імпактні структури (астроBLEMи) потрібно розглядати як нетрадиційні джерела енергетичної сировини. Розвідка та експлуатація цих джерел дозволить у найближчий час виконати значне нарощування енергетичного потенціалу та, у свою чергу, зміцнити національну безпеку країни. Головними об'єктами досліджень були такі імпактні структури України, як Бовтиська та Оболонська. Як першочерговий об'єкт для проведення цілеспрямованих геологорозвідувальних робіт пропонується Бовтиська структура.

Ключові слова: астроBLEMа, імпактна структура, водень, вуглеводень, гелій, Оболонська імпактна структура, Бовтиська імпактна структура.

Актуальність проведених досліджень зумовлена необхідністю розширення паливно-енергетичної сировини мінерально-сировинної бази України, у т.ч. за рахунок нетрадиційних джерел вуглеводнів. Міжнародний досвід вивчення імпактних структур (астроBLEM) свідчить, що з ними можуть бути пов'язані крупні промислові родовища нафти і газу.

Аналіз публікацій за темою досліджень. В існуючій літературі надається аналіз утворення, особливостей будови, корисних копалин імпактних структур. В останні десятиріччя у світі значно зріс інтерес до імпактних структур як потенційно перспективних для відкриття в них промислових покладів корисних копалин, у тому числі покладів вуглеводнів (ВВ). Прогнозування перспективних площ на видобуток вуглеводнів у таких незвичайних об'єктах, як імпактні структури, потребує знань про їх утворення, будову, розвиток і руйнацію. Необхідно знати як і чим заповнюється кратер після утворення. Вивчення відомих родовищ вуглеводнів, пов'язаних з цими структурами, дозволяє визначити з якою морфологічною частиною кратера пов'язані самі поклади. Заповнювальний структурно-літологічний комплекс включає постударні осадові відклади, що відкладаються в кратері. Кратер поступово заповнюється відкладами, які зносяться з валу, осадами морського або озernого генезису.

Ще у другій половині ХХ ст. у всьому світі імпактні структури почали вивчатись як можливі нетрадиційні джерела вуглеводневих ресурсів та інших корисних копалин. Цьому питанню присвячено роботи (Westbroek, Stewart, 1996), в Україні – роботи (Багрій та ін., 2016, 2018; Крайшкін, Гуров, 1989; Михайлов та ін., 2011, 2013; Петровський та ін., 2014) та багато інших. Під час досліджень враховувався досвід відкриття й експлуатації родовищ нафти і газу, пов'язаних з імпактними

структурами у США, Канаді, інших країнах, та родовищ горючих сланців. Вивчення походження нафти і газу дало розвиток ідеям гідро-біогенно-абіогенного походження та їх пошуку не тільки в осадових басейнах, але й у межах фундаменту. Перспективними структурами цього пошуку є імпактні структури. Однак постає питання, де в імпактних структурах можливе утворення нафти, газу, гелію та водню.

На сьогодні у восьми осадових басейнах відомо 14 імпактних структур з промисловою нафтогазоносністю, з яких видобувають вуглеводні. Всі вони розташовані у відомих нафтогазоносних провінціях.

- Структура Авак (Avak) (США, Аляска) (газ). Добовий видобуток газу становить 37 тис. м³, запаси – 1,1 млрд м³.

- Структура В'юфілд (Viewfield) (Канада, пров. Саскачеван) (нафта). АстроBLEMа розташована в канадській частині Уїлстонського нафтогазового басейну. З розрахунку на одну свердловину добовий видобуток нафти з надр астроBLEMи сягає 87 т, газу – 7,4 тис. м³. Запаси нафти становлять 1,6 млн т, газу – 130 млн м³.

- Структура Еймс (Ames) (Емсова Яма або Емсова Діра) (США, Оклахома) (нафта, газ). Продуктивних свердловин – 40, пустих – 49. Породи-колектори – граніти, карбонати. З розрахунку на одну свердловину добовий видобуток нафти становить 390 т, газу – 88 тис. м³. Запаси нафти – 3,8 млн т, газу – 430 млн м³.

- Структура Ігл-Батт (Eagle Butte) (інша назва Ігл-Б'ютт, Канада, провінція Альберта) (газ). Газ видобувають п'ятьма свердловинами. Чотири з них розташовані у південно-східній частині астроBLEMи – на схилі направлено до центру кратера зовнішнього кільцевого валу, ще одна на схилі направлено до внутрішнього

© Багрій І., Гафич І., Паюк С., Солодкий Є., Ярошовець-Баранова К., 2023

кільцевого жолобу північно-східного схилу центрального підняття.

- **Структура Кан-Ам (США, шт. Мічиган) (нафта, газ).** Кільцева структура визначена під дном південної частини оз. Гурон, на глибині близько 2 км, вік утворення близько 500 млн років (Краюшкин, 1994). У зоні впливу імпаکتної структури (виникнення тріщинуватості) тільки на суходолі відомо 65 родовищ нафти і газу, колекторами яких служать піски верхнього кембрію, вапняки і пісковики середнього девону, а також вапняки і доломіти ордовіку і силуру.

- **Структура Лайс Ранч (інша назва Лайлес Ренч, Бі Блаф, Увал) (США, Техас) (газ).** Виявлена в 1979 р. у Південному Техасі (США, нафтогазовий басейн Мексиканської затоки) при аналізі аерофотознімків. У межах структури – чотири продуктивних свердловин і п'ять пустих. Колектори – пісковики (Donofrio, 1998). З розрахунку на одну свердловину добовий видобуток газу з надр сягає 2 тис. м³, запаси 57 млн т.

- **Структура Маркез (інша назва Маркез Доум) (Marquez) (США, Техас) (нафта, газ).** Видобуток вуглеводнів виконується з пісковиків центрального підняття і валу, з глибини 2700 м. Добовий видобуток нафти 5 т, газу 51 тис. м³. Запаси нафти становлять 15–23 тис. т.

- **Структура Мідлсборо (США, Кентукі) (нафта).** Кратер діаметром 5,8 км розташований у шт. Кентуккі, США, на межі штатів Вірджинія й Теннессі. Структура має центральне підняття і зовнішній концентричний кільцевий вал (Краюшкин, 1994). За геологічними даними, вік кратеру понад 300 млн років. Добовий видобуток нафти 42 т. Запаси нафти 2,3 млн т.

- **Структура Ньюпорт (Newporte) (інша назва Де-Ляк) (США, Півн. Дакота) (нафта).** З розрахунку на одну свердловину добовий видобуток нафти з надр астроблеми становить 633–2432 м³, газу – 283 тис. м³.

- **Структура С'єрра Мадера (Sierra Madera) (США, Техас) (газ).** Продуктивні глибини 2800–3100 м. Колектори – карбонати. Видобуток газу ведеться з центрального підняття і валу.

- **Структура Стін Рівер (Steen River) (Канада, Альберта) (газ).** Діаметр структури 25 км, вік 94 млн років. На поверхні структура не знаходить прояву і перекрита шаром осадових відкладів товщиною 200 м. Видобуток вуглеводнів ведеться з карбонатів, глибини продуктивних горизонтів 1100–1200 м. Добовий видобуток нафти 83 т, запаси – 45–75 тис. т.

- **Структура Ред Уінг Крік (Red Wing Creek) (США Півн. Дакота) (нафта, газ).** Астроблема розташована в Уїлстонському нафтогазовому басейні і похована під осадовими відкладами потужністю 2000 м. На знімках не відображається. З розрахунку на одну свердловину добовий видобуток нафти з надр астроблеми дорівнює 150 т, газу – 65 тис. м³. Запаси нафти 3 млн т, газу – 700 млн м³.

- **Структура Чиксулуб (Chicxulub) (Мексика, Юкатан) (нафта, газ).** Вперше кратер було визначено при проведенні геофізичних робіт (пошук нафти) на півострові Юкатан (Penfield, 1981).

На сьогодні, як зазначено вище, відомо 14 імпактних структур (10 у США, 3 у Канаді, 1 у Мексиці) із встановленою промисловою нафтогазоносністю. Це становить близько 5 % від загальної кількості відомих імпактних структур. Всі вони лежать у межах відомих вуглеводневих осадових басейнів; відкриті родовища вуглеводнів розташовані в межах центрального підняття або кільцевого валу імпактної структури. В імпактних структурах Еймс і Ньюпорт видобуток вуглеводнів ведеться з

фундаменту, що вказує на високі перспективи пошуку вуглеводнів не лише в осадових басейнах, а й у породах фундаменту, де пошук обмежений як можливостями геофізичних методів, так і теоретичними міркуваннями. Найбільш вивченою імпактною структурою в кристалічному фундаменті є розташована на Балтійському щиті Сільянська імпактна структура, де бурінням з метою видобутку вуглеводнів вивчався підкратерний простір. Буріння кількох свердловин з негативним результатом досі, на думку авторів, не закрило питання про її перспективність на видобуток вуглеводнів.

Зв'язок вуглеводневих родовищ з осадовими басейнами у світі не викликає суперечок, однак доказ їхнього зв'язку з імпактними структурами для деяких з них встановлено через тривалий час. Так, структуру Авак відкрито у 1943–1945 рр., однак лише у 1996 р. доведено, що це імпактна структура. Структуру Ігл-Батт відкрито у 1962 р., а її імпактне походження доведено у 1993 р. Перше буріння на структурі Ред Уінг Крік виконано у 1965–1968 рр., перший нафтовий поклад відкрито у 1972 р., а її імпактне походження встановлено у 1999 р. Отже, визначення зв'язку покладу вуглеводнів з імпактною структурою може займати тривалий час. Цілеспрямоване вивчення будови родовищ вуглеводнів може привести до відкриття нових імпактних структур і пов'язаних з ними родовищ вуглеводнів.

В Україні відомо сім імпактних структур, шість з яких розташовані в центральних районах УЩ. Ще у 1989 р. (Краюшкин, Гуров, 1989), виходячи з даних аналізу світового досвіду відкриття родовищ нафти і газу, пов'язаних з астроблемами, висловили тверде положення: "... все астроблеми України, конечно, также представляют принципиально новый и перспективный объект на нефть и газ". На думку цих авторів, доцільно якомога швидше почати буріння на нафту і газ, заклавши хоча б одну параметричну свердловину.

Ці положення та прогнози у подальшому знайшли обґрунтування в комплексній роботі вчених Інституту геологічних наук НАН України і виробництв "Нафтогазовий потенціал астроблем України" (1994). Як першочерговий об'єкт пошуків пропонується Оболонська імпактна структура, яка зосереджена в крайовій частині південного борту ДДз на його зчленуванні з північно-східним схилом УЩ. Розташування кратера Оболонської астроблеми, що межує з нафтогазоносною областю, та наявність тут потужної товщі платформних відкладів дозволяють розглядати його як імовірну перспективну нафтогазоносну структуру, кратер Бовтиської імпактної структури заповнений горючими сланцями.

Порівняльне вивчення українських астроблем і деяких нафтогазоносних кратерів Північної Америки (Ames..., 1997; Sawatzky, 1974) показує близькість їх будови і свідчить про ймовірність виявлення в них покладів ВВ (Краюшкин, 1994; Краюшкин, Гуров, 1989; Гуров, Гожик, 2006; Масайтис та ін., 1976). Найперспективнішим, на наш погляд, є Бовтиська імпактна структура, в якій виявлено сланцеві поклади. Перспективам нафтогазоносності імпактних структур Українського щита присвячені опубліковані роботи В.А. Михайлова та його колег (Михайлов та ін., 2013).

Мета досліджень – оцінка перспектив видобутку енергетичних ресурсів в астроблемах України (вуглеводні, горючі сланці, буре вугілля, водень, гелій) за СТАГД.

Виклад основного матеріалу. Детально охарактеризовані геологічна будова, відображення в геофізичних полях та отримані результати площинних приповерхневих зйомок на вуглеводні, водень та гелій, що складають

відомі імпакті структури – Бовтиську та Оболонську. Вуглеводневий потенціал імпактіх структур автори пов'язують передусім із покладами горючих сланців, а також із кристалічним фундаментом кратерів. Нижче надаються результати вивчення нафтогазоносності імпактіх структур України комплексом структурно-термо-атмо-гідролого-геохімічних досліджень (СТАГГД).

Бовтиська імпактіна структура розташована на межі Кіровоградської і Черкаської областей у межах верхньої течії р. Тясмин (правої притоки р. Дніпро) та її приток. До центра структури в радіальних напрямках стікаються річки, які зливаються з утворенням р. Тясмин у 3 км на південний схід центру западини (рис. 1.) Далі р. Тясмин тече в північно-західному напрямку і прорізає передбачуваний цокольний вал кратеру імпактіної структури в районі м. Кам'янка в 16–18 км від центра структури. У руслі річки тут виходять кристалічні породи. По обох берегах, у глибокому каньйоні (8–10 м) спостерігаються катаклазовані граніти. Бовтиська імпактіна структура належить до одного з найвивченіших геологічних об'єктів України. Це пов'язано з тим, що тут виявлено та розвідано родовище горючих сланців.

Геофізичними роботами (гравіметрія, магніторозвідка, сейсмозвідка) було встановлено, що на гравіметричних картах западина виділяється як великий мінімум та має диференційоване магнітне поле. Результати геофізичних робіт дозволили зробити висновок, що западина в кристалічному фундаменті є замкнутою, зв'язок з ДДз відсутній. Глибина западини визначалась від 600 до 1500 м (рис. 2).

У науковій літературі широко обговорювалось походження Бовтиської западини, і протягом вивчення існували різні погляди щодо її виникнення (накладена западина, вулканоструктура, астроблема та ін.) (Галака та ін., 1955; Грабовський та ін., 1970; Гуров та ін., 2010; Михайлов, та ін., 2013; Рябенко та ін., 1982 та ін.). Наявність біля с. Бовтиськ у кристалічному фундаменті западини, виповненої осадовими породами мезо-кайнозойського віку, вперше встановив Л.Г. Ткачук у 1930–1932 рр.

Більш інтенсивне вивчення геологічної будови Бовтиської западини було розпочате після 1964 р. у зв'язку з проблемою твердого палива – горючих сланців (рис. 3). На території її розташування проводилися геологічні зйомки масштабу 1 : 50 000 (В.Г. Злобенко, В.П. Брянський, М.Ф. Піддубник, В.О. Поповіченко). Ці роботи дозволили

значно змінити погляди та уявлення щодо геологічної будови структури, стратиграфії виповнюючих осадових порід, положення в розрізі шарів так званих туфів, вулканічних лав, брекчій різного складу, а також горючих сланців. Змінювались погляди на походження, природу, вік утворення Бовтиської западини та покладів горючих сланців від вулканічно-тектонічної структури (Галака, Грабовський, 1967) до ударно-метеоритного або метеоритно-вибухового (Голубев та ін., 1974).

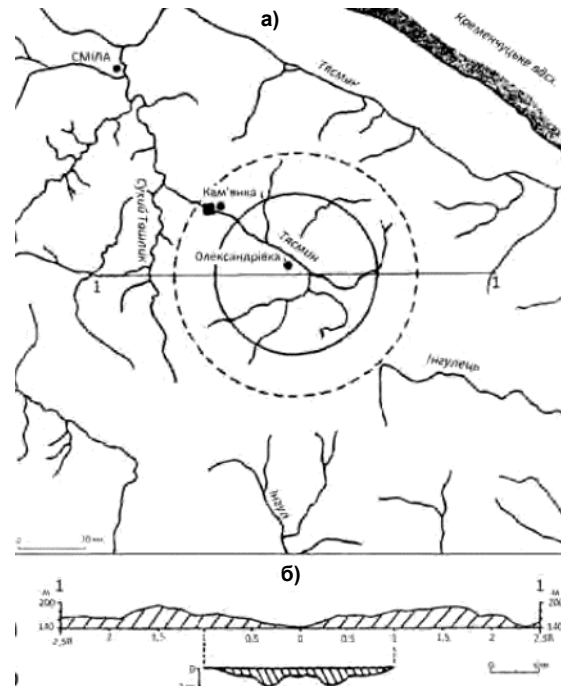


Рис. 1. Будова сучасної гідромережі в районі Бовтиської імпактіної структури (а) (за Гуров, Гожик, 2006) та морфологічний профіль по лінії I-I (б) (за А.Ю. Ямниченко)

Контур кратера зображено суцільною лінією; вісь морфологічно визначеного вала депресії – пунктиром; вихід на денну поверхню цокольного вала кратеру зображено квадратом. Морфологічний профіль Бовтиської імпактіної структури (а) і морфологічний розріз кратеру в кристалічних породах основи (б)

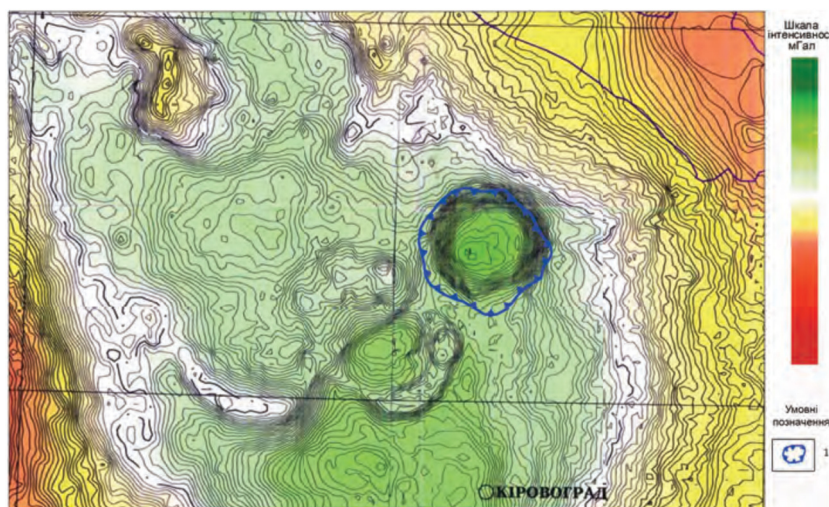


Рис. 2. Бовтиська імпактіна структура на карті "Схема гравітаційного поля України" Масштаб 1 : 1 000 000, (ПДГРП "Північгеологія", Т.С. Нечаєва, Л.М. Шимків та ін., 2002 р.): 1 – контур Бовтиської імпактіної структури

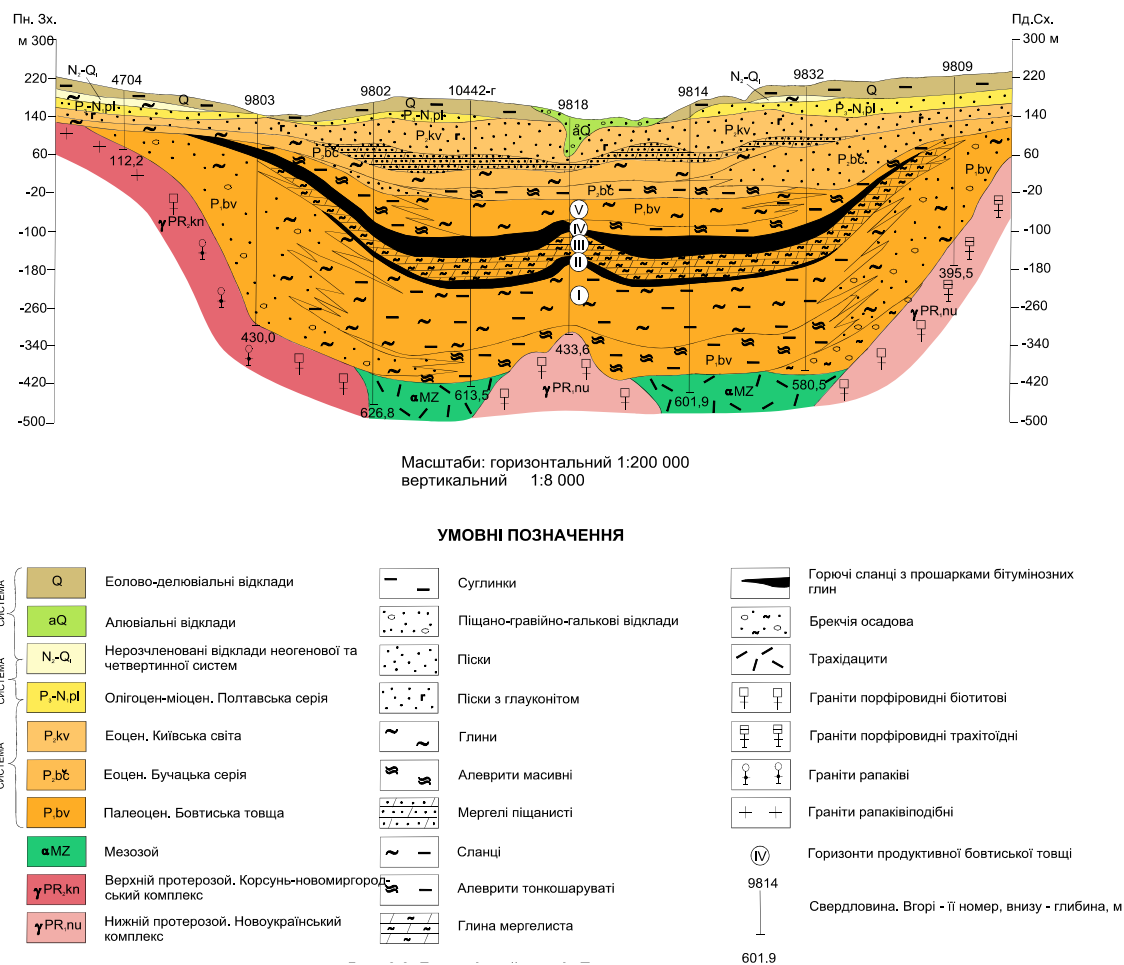


Рис. 3. Геологічний розріз Бовтиської структури

Геофізичними роботами (гравіметрія, магніторозвідка, сейсморозвідка (Є.В. Поллипас та ін.) було встановлено, що на гравіметричних картах западина виділяється як великий мінімум та має диференційоване магнітне поле. Результати геофізичних робіт дозволили зробити висновок, що западина в кристалічному фундаменті є замкнутою, зв'язок з ДДЗ відсутній. Глибина западини визначалась від 600 до 1500 м.

На ділянці робіт (Бовтиська котловина та її обрамлення) було пробурено близько 500 свердловин, з яких 79 досягли кристалічного фундаменту, у 20 свердловинах описані ударно-розплавлені породи, туфи, туфобрекції. Більшість свердловин розкрили повний розріз осадового чохла, у тому числі п'ять горизонтів (шарів) горючих сланців. Отже, вперше у Бовтиській западині було розкрито повний геологічний розріз, визначено запаси і ресурси Бовтиського родовища горючих сланців, охарактеризовано їх літологічний і хімічний склад, визначено перспективи їх використання як енергетичної сировини. Оцінку горючих сланців Бовтиського родовища як джерела енергетичної сировини виконували різні спеціалізовані організації колишнього Радянського Союзу і УРСР протягом багатьох років. У результаті встановлено, що сланці можуть бути використані як паливо для електростанцій, сировина для одержання моторного палива, мастил, висококалорійного газу, парафіну, азотних сполук, поверхнево активних речовин, гербіцидів тощо. Загальні ресурси і запаси горючих сланців Бовтиського родовища були підраховані у кількості 3887 млн т (Гравовський та ін., 1970). Відповідні розрахунки дозволяють припустити, що зі смол Бовтиського родовища можна витягнути 800 млн т сирової нафти. Як

джерело природного газу сланці не вивчалися. Найбільш повна характеристика горючих сланців Бовтиської западини та перспективи їх використання висвітлені в роботах (Михайлов та ін., 2011; 2013).

Бовтиська імпактна структура розташована в басейні р. Тясмин, правої притоки р. Дніпра, і є найбільшою на Українському щиті. Для складання детальної схеми дешифрування і вивчення особливостей сучасного тектонічного плану структури використовувались космічні знімки Landsat ETM+ (8-й канал високої роздільної здатності збільшений до масштабу 1 : 50 000). По створеній детальній схемі дешифрування був виконаний статистичний аналіз поля лінементів з допомогою програми "WinLessa". У результаті аналізу було побудовано розу лінементів Бовтиської структури та карта щільності лінементів флюїдонепроникних зон.

У рамках проведених досліджень на підготовчому етапі досліджень виконано збір, систематизацію, аналіз та введення у відповідні бази близько 30 літературних та фондових інформаційних джерел щодо геолого-структурної будови Бовтиської структури. Необхідно зазначити, що незважаючи на велику кількість пробурених свердловин (понад 500) геофізичними методами (гравіметричними, магнітометричними, сейсмічними дослідженнями) структура вивчена недостатньо, а свердловинами остаточно не розкритий на всю глибину кільцевий прогин навколо центрального підняття. Польові дослідження за СТАГД (рис. 4) виконано на площі 1951 км², за мережею пункти спостережень (ПС) 4x4 км за межами кратеру і 3x3 км – у його межах.

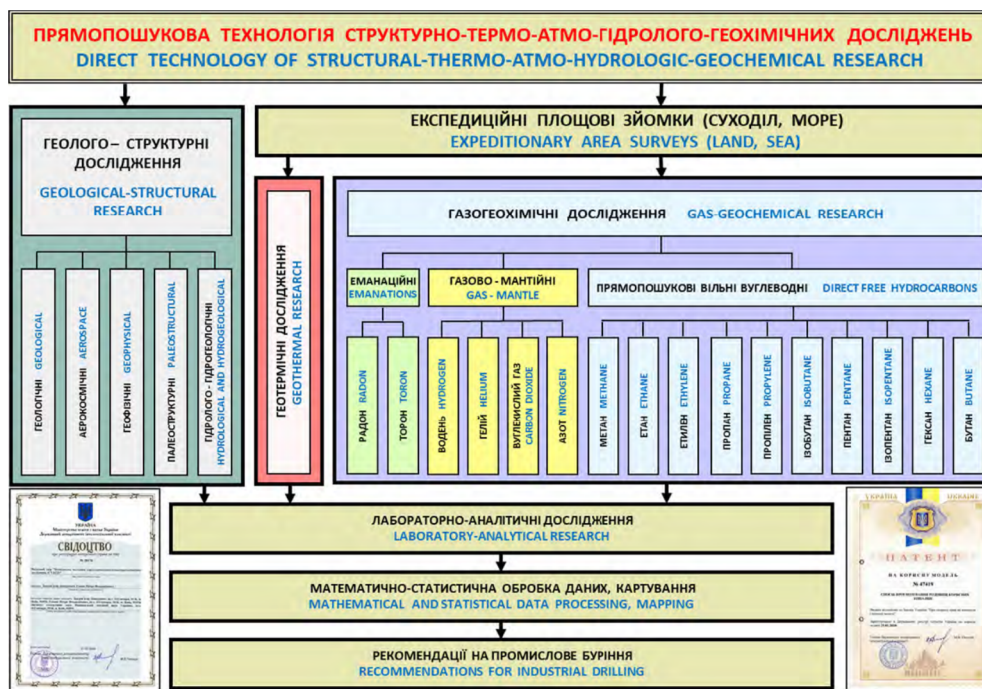


Рис. 4. Принципова схема СТАГГД

На окремих профілях крок між пунктами спостережень (ПС) дорівнював 1–2 км. Загальна кількість ПС – 181, з них 59 ПС (33 % від загальної кількості) розташовані в кратері імпульсної структури, інші ПС – між кратером імпульсної структури і кільцевою структурою, визначеною за результатами дешифрування МКЗ. Об'єктами досліджень були: Бовтиська імпульсна структура і однойменна кільцева структура, що за розмірами перевищує останню. Пункти спостереження за межами кільцевої структури фактично відсутні.

Проведений комплекс досліджень дозволив уточнити будову структурно-тектонічних елементів Бовтиської імпульсної структури і однойменної кільцевої структури, виділеної за даними інтерпретації МКЗ, та ділянки досліджень загалом. З'ясовано, що в межах кратеру проходить розвантаження легких вуглеводнів, але їх концентрація значно менша, ніж важких. Більшість показників мають аномальні і підвищені значення між визначеним кільцевим валом і кратером імпульсної структури.

Газогеохімічні дослідження включали визначення вуглекислого газу, гелію та водню.

Вуглекислий газ (CO_2 , об. %). Розподіл показників вмісту вуглекислого газу загалом збігається з розподілом показників радону і торону. Аномалії спостерігаються в межах перетинання кратера Бовтиської структури і Кіровоградського глибинного розлому; у межах південно-східної частини ділянки досліджень аномалії можуть бути пов'язані з кільцевим валом.

Гелій (He , $\text{п} \cdot 10^{-3}$, об. %). Гелій визначено у 33 пунктах спостереження (рис. 5). Аномалії газу утворюють зону загального північно-східного простягання.

Водень (H_2 , $\text{п} \cdot 10^{-3}$, об. %). Водень зазвичай асоціює з газами глибинного походження. Аномалії водню в межах ділянки досліджень мають як поодинокі (точкові), так і лінійно витягнуті контури (рис. 6).

На підставі проведених робіт СТАГГД у межах площі досліджень визначено перспективні ділянки на пошуки вуглеводнів, водню та гелію (рис. 5–7).

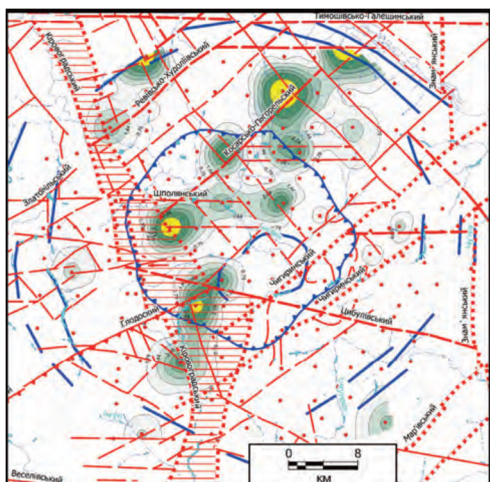


Рис. 5. Схема просторового розподілу показників вмісту гелію в підґрунтовому повітрі

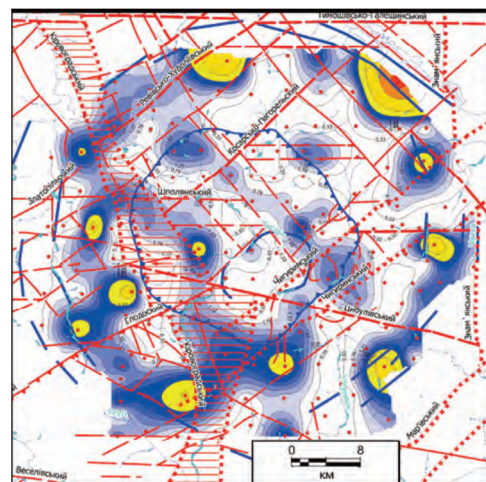


Рис. 6. Схема просторового розподілу показників вмісту водню в підґрунтовому повітрі

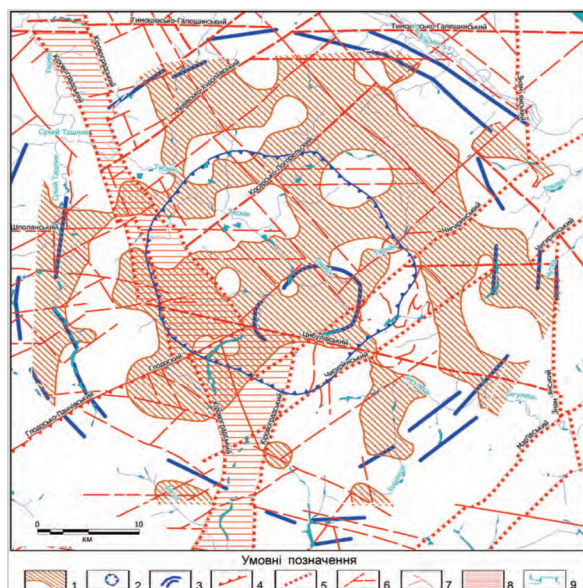


Рис. 7. Карта просторового розташування флюїдонепроникних ділянок, перспективних на пошуки пасток вуглеводнів (на структурно-тектонічній основі):

- 1 – ділянки, перспективні на пошуки пасток вуглеводнів; 2 – контури кратера, 3 – фрагменти кільцевих структур за результатами дешифрування МКЗ; розломи: 4 – підкиди, 5 – скиди, 6 – головні, 7 – другорядні, 8 – зона Кіровоградського глибинного розлому; 9 – гідрографічна мережа

Масштаб (детальність робіт) мережі пункти спостережень (ПС) внаслідок великого розміру кратеру і ще більш великого кільцевого валу дозволяє говорити лише про загальні риси розподілу газів у межах ділянки досліджень. Рекомендується проведення високоточних гравіметричних і магнітометричних досліджень, сейсморозвідки за технологією 3D з метою вивчення будови кратеру, проведення детальних робіт з більш щільною мережею і концентрацією ПС у межах перспективних ділянок за технологією СТАГД.

Оболонська імпактна структура. Географічно Оболонська структура розташована на лівобережжі р. Дніпро, на водорозділі річок Сули і Хорол, західніше структури – Кременчуцьке водосховище. Район характеризується рівнинним, слабо розчленованим рельєфом і належить до Придніпровської низини. Більша його частина зосереджена на терасах рр. Сули і Дніпра, характеризується наявністю невеликих озер, заболоченістю; тут протікає невелика р. Крива Руда.

У межах Оболонської структури на порівняно незначній площі виконаний комплекс геофізичних досліджень різних модифікацій і масштабів, який був орієнтований на детальне вивчення структури, як об'єкта на енергетичні корисні копалини (горючі сланці, вуглеводні). У плані реалізації програми робіт з пошуків родовищ горючих сланців у 1965–1966 рр. у межах Оболонської западини було пробурено дві глибокі свердловини – №№ 5301 і 5302. Свердловини розкрили під відкладами кайнозою, крейди і верхньої юри товщу теригенних утворень з уламками туфобрекчій і кристалічних порід. На сьогодні ці свердловини є єдиними, що пробурені в межах кратера Оболонської імпактної структури.

Картувальні ознаки Оболонської імпактної структури і результати порівняльного аналізу досвіду з вивчення та практичного використання нафтогазоносності імпактних структур Канади і США дозволили вченим Інституту геологічних наук – В.А. Краюшкіну і Є.П. Гурову ще у 1971 р. зробити спробу прогнозу оцінки нафтогазового потенціалу Оболонської структури і надати рекомендації щодо їх вивчення і пошукового буріння на вуглеводні (Краюшкін, Гуров, 1987). Згідно з рекомендаціями пропонувалось буріння параметричної свердловини Оболонська-1 у центрі

структури для розкриття її підкратерної зони. Відповідно до рекомендацій програми співробітниками Інституту геологічних наук, ДГП "Чернігівнафтогазгеологія" та інших виробничих організацій був виконаний додатковий випереджальний комплекс геолого-геофізичних, геохімічних та інших спеціальних робіт у районі Оболонської структури і безпосередньо в межах самої структури.

За результатами електророзвідувальних робіт методом ССП ДГП "Чернігівнафтогазгеологія" (Кукурудза, 1991) у зоні зчленування зовнішнього валу Оболонської імпактної структури з кратером встановлено слабоінтенсивні позитивні аномалії, які простежуються від фундаменту через весь розріз осадового чохла. У цей же час ДГП "Чернігівнафтогазгеологія" виконує газогеохімічні дослідження у межах Оболонської структури. У палеоген-четвертинних відкладах були виявлені підвищені концентрації водорозчиненого метану (6,2–15,8)•10–3 см³/л).

Вперше було проведено аналіз особливостей будови нафтогазоносних астроблем США, Канади та інших країн, походження і накопичення ВВ у різних частинах імпактних структур. На базі зібраних матеріалів щодо різних видів досліджень та їх успішності при пошуках родовищ ВВ в імпактних структурах, в роботах (Краюшкін, Гуров, 1989; Баєрій та ін., 2016, 2018) наведено науково обґрунтовану доцільність нафтопошукового буріння на всіх астроблемах, відомих на території України і, насамперед, на Оболонському кратері, вже підготовленому до буріння геофізичними методами (рис. 8).

Глибина рекомендованої свердловини Оболонська-1 повинна була бути не меншою за 5000 м. Проблеми перспектив нафтогазоносності імпактних структур вчені і спеціалісти нафтогазової та інших галузей обговорювали на різних рівнях. Матеріали обговорень і відповідних прогнозів викладені в опублікованих роботах (Краюшкін, Гуров, 1989; Баєрій та ін., 2016, 2018). Внутрішня будова імпактної структури встановлена авторами під час вивчення керна двох свердловин – №№ 5301 і 5302, пробурених на захід і північний захід від центра кратера, детально вивчений склад порід коптогенного комплексу, їх петрографічні, петрофізичні, геохімічні, мінералогічні особливості та імпактні ознаки (Кукурудза, 1991).

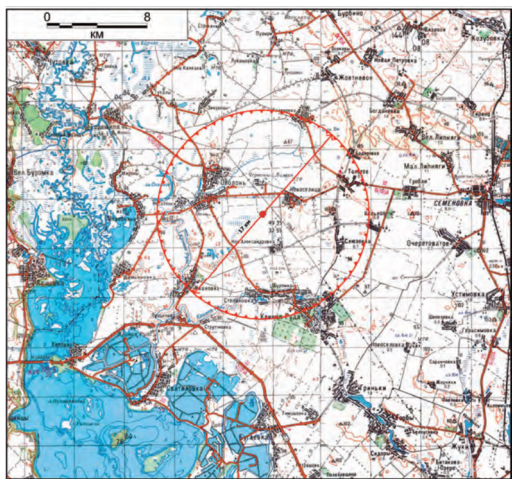


Рис. 8. Схема розташування Оболонської імпактної структури (на топографічній основі)

На Оболонській площі на замовлення НАК "Нафтогаз України" було проведено високоточні гравімагнітометричні і геохімічні дослідження та комплексну інтерпретацію геолого-геофізичних даних з метою вивчення особливостей глибинної будови та прогнозування поширення зон розвитку колекторів різного типу на території Оболонської площі (виконавець комплексних геолого-геофізичних досліджень – ТОВ "Віртус-XXI"; площа робіт – 423,2 км²). У результаті створена 3D інтегральна геолого-геофізична модель Оболонської площі та глибинної будови Оболонської імпактної структури, наданий прогноз пошукових площ з покращеними колекторськими властивостями (як у кристалічному фундаменті, так і в осадовому

чохлі), оцінена нафтогазоперспективність Оболонської структури, надані рекомендації щодо подальшого проведення геологорозвідувальних робіт та розміщення пошукових свердловин. Вивченню особливостей геологічної будови та оцінці перспективності нафтогазоносності Оболонської імпактної структури на основі застосування нових напрямків у технології інтегральної інтерпретації комплексу геолого-геофізичних даних присвячені деякі роботи НТФ "Біпекс ЛТД" (Петровський, 2014).

Найбільш повна систематизація матеріалів щодо геолого-геофізичної будови та перспектив нафтогазоносності Оболонської структури міститься в роботі (Михайлов та ін., 2013). У 2005 р. на території Оболонської структури відділ геоекології та пошукових досліджень ІГН НАН України проводив приповерхневі комплексні структурно-термо-атмогеохімічні дослідження. Методика досліджень, опублікована в численних роботах І.Д. Багрія та колег (Багрій та ін., 2016, 2017), зареєстрована Державним департаментом інтелектуальної власності Міністерства науки і освіти.

Польові дослідження були виконані на площі 510,1 км² за системою профілів. Відстань між профілями – 4000 м, між пунктами спостережень на профілі – 1000 м; всього пунктів спостережень – 150. Виділені ділянки найбільш перспективні на пошуки ВВ. У 2010 р. за цією ж методикою на площі 420 км² на Оболонській структурі проведено аналогічний комплекс досліджень СТАГД на 180 пунктах (15 профілів, крок між пунктами – 1500 м). Роботи за методикою СТАГД виконувались у межах Оболонської структури тричі – у 2005, 2011 та 2013 рр.; результати математично-статистичної обробки даних лабораторно-аналітичних досліджень СТАГД наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Зведені дані польових досліджень на Оболонській структурі				
№	Місяць, рік досліджень	Кількість пунктів спостережень	Площа досліджень, км ²	Профільний або площинний варіант досліджень
1	07.2005	150	474,2	Площинні дослідження за мережею: по профілю 1 км, між профілями 3–4 км
2	08.2011	180	420	Площинні дослідження за мережею 1,5х1,5 км
3	09.2013	109	250	Профільні з кроком по профілю 1 км

Газогеохімічні дослідження проведено за вуглекислим газом, гелієм та воднем.

Вуглекислий газ (CO₂, об. %). За розподілом газів можна побачити, що середні і аномальні значення показника ("середнє + 3S") зійомок 2005 і 2011 рр. (рис. 9, 10), збігаються між собою, а за зійомкою 2013 р. – у два рази менші.

Можливо це пов'язано з тим, що відносно більша кількість пунктів спостережень 2013 р. розташована за межами Оболонської структури. За розподілом показника у східній і південній частині площі фіксується зона фонових значень уздовж зовнішньої частини Оболонської структури.

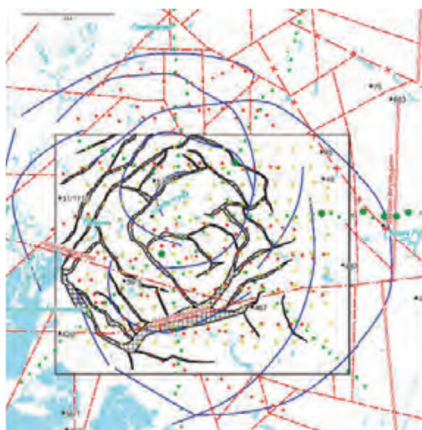


Рис. 9. Схема розташування ПС, в яких зафіксований гелій у підґрунтового повітрі при зійомках СТАГД

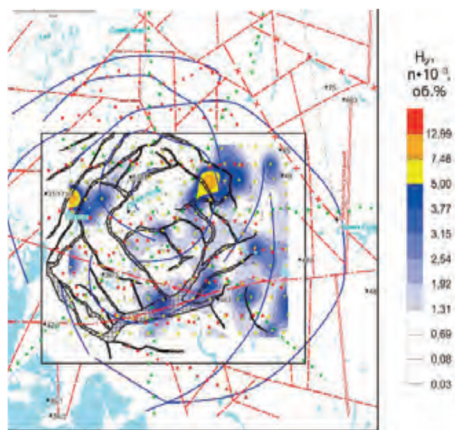


Рис. 10. Схема просторового розподілу показників вмісту водню в підґрунтового повітрі

Гелій (He, $n \cdot 10^{-3}$ об.%). За результатами дослідження 2005 р. гелій було виявлено в одній пробі в центрі Оболонської структури. За результатами зйомки 2011 р. побудовано карту розподілу гелію. За цими даними гелій фіксувався по колу зовнішньої частини Оболонської структури, особливо в її північній частині, а також фіксувалися ПС, витягнуті у північно-західному напрямку в центральній частині структури.

Водень (H_2 , $n \cdot 10^{-3}$ об.%). За результатами досліджень 2005 р. водень було виявлено у восьми пунктах, які розташовані за межами Оболонської структури. За результатами досліджень 2013 р. водень було виявлено у 29 пробах. Варто відзначити, що загалом водень фіксується за межами структури, а в її межах водень зустрічається у ПС, які збігаються з порушеннями.

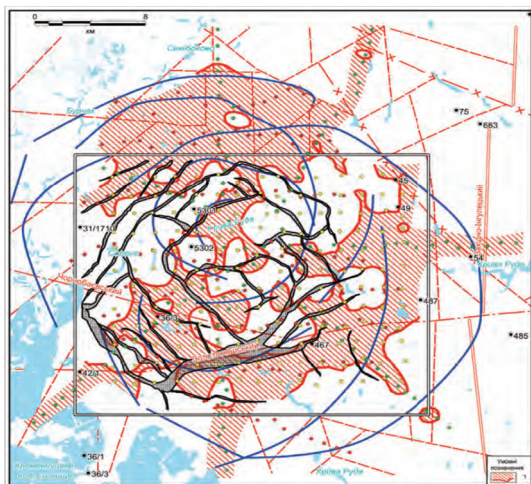


Рис. 11. Схема просторового розташування флюїдонепроникних ділянок, перспективних на пошуки пасток вуглеводнів (на структурно-тектонічній основі):
1 – контури флюїдонепроникних ділянок, перспективних на пошуки пасток вуглеводнів

Висновки. У процесі виконання досліджень були розроблені, удосконалені та випробувані різні методи математико-статистичної обробки даних. Автори вважають, що знайдений комплекс таких методів є оптимальним. Об'єднання в єдину систему окремих методів математико-статистичної обробки великих за обсягом масивів даних значно підвищує інформативність і ефективність самого процесу. Побудовані за даними обробки карти, геолого-геохімічні профілі є за своєю суттю математико-статистичними моделями. На основі результатів обробки одержаних фактографічних даних були складені карти просторового розподілу показників температури, еманційних показників (радон, торон), співвідношення еманційних газів, вмісту у підґрунтовому повітрі гелію, водню, вуглекислого газу, вуглеводневих газів, інформативних інтегральних коефіцієнтів та ін.

Досвід проведених досліджень свідчить про необхідність системного вивчення у межах імпактних структур гідролого-гідрогеологічних часових розрізів (по створах), у т. ч.:

- гідрологічного обстеження і гідрометричної зйомки водотоків;
- радонометричного обстеження;
- відбір проб донних відкладів з визначенням складу розчинених у них газів.

Аналіз результатів проведених комплексних досліджень будови та перспектив нафтогазоносності імпактних структур (астроблем) України, а також міжнародного досвіду розвідки

та експлуатації нафтогазоносних структур США, Канади та інших країн дозволяє зробити такі висновки.

1. З імпактними структурами можуть бути пов'язані нетрадиційні джерела енергетичної сировини – нафти і газу. Найперспективнішими на виявлення покладів вуглеводнів промислового значення, на думку авторів, є Бовтиська та Оболонська імпактні структури України. Як першочерговий об'єкт для проведення цілеспрямованих геологорозвідувальних робіт пропонується Бовтиська структура, де розвідано родовище горючих сланців із запасами близько 4 млрд т. Сланці можуть бути використані як паливо для електростанцій і промислового вилучення вуглеводнів (до 800 млн т сирової нафти або 2,7 трлн m^3 горючого газу).

2. Результати проведеного комплексу приповерхневих СТАГД, розробленого в ІГН НАН України, дають підстави стверджувати, що в підкратерній та підвальної зонах Бовтиської структури можуть бути виявлені значні запаси вуглеводнів.

Отже, проведення в найкоротші терміни цілеспрямованих комплексних геолого-геофізичних робіт (у т. ч. буріння свердловин), а на підготовчому етапі – СТАГД, ефективність яких доведена під час пошуків нафтогазоносних структур різного генезису, на суші й акваторіях Чорного та Азовського морів, буде сприяти розв'язанню проблем енергетичної безпеки держави.

Список використаних джерел

- Багрий, І.Д., Почтаренко, В.І., Дубосарський, В.Р., Янцевич, О.О., Семенюк, В.Г., Грига, М.В., Малишев, О.М., Гафич, І.П. (2016). Геолого-структурно-геохімічні особливості формування родовищ горючих сланців та вуглеводневих покладів Бовтиської імпактної структури. *Геологічний журнал*, 17–42.
- Багрий, І.Д., Альохін, В.І., Дубосарський, В.Р., Почтаренко, В.І., Семенюк, В.Г., Гафич, І.П., Лактіонов, І.С. (2017). Спеціальні методи в геології. Покровськ: ДВНЗ "ДОНТУ", 215 с.
- Багрий, І.Д., Гожик, П.Ф., Рудько, Г.І. та ін. (2018). Нафтогазоносність імпактних структур України. Київ–Чернівці: Букрек, 503 с.
- Басс, Ю.Б., Галака, А.І., Грабовський, В.І. (1967). Болтышские горючие сланцы. *Разведка и охрана недр*, 9, 11–15.
- Галака, А.М. і др. (1955). Отчет о результатах геологопоисковых работ в районе Болтышской депрессии (по работам Петриковской партии) за 1953–54 гг. К.: Фонды НВП "Геоинформ України".
- Голубев, В.А., Карпов, Г.М., Поповиченко, В.А. (1974). Про метеоритно-вибухове походження Бовтиської западини на Кіровоградщині. *Доп. АН УРСР. Сер. Б*, 1, 10–12.
- Грабовський, В.К., Риздвянський, К.Ф., Солодовниченко, А.П., Шендринская, Г.А. (1970). Отчет о предварительной разведке Болтышского месторождения горючих сланцев 1967–1969 гг. (Кировоградская и Черкасская обл. УССР). К.: Фонды НВП "Геоинформ України".
- Гуров, Е.П., Гожик, П.Ф. (2006). Импактное кратерообразование в истории Земли. НТП "Нафтогаз-прогноз", 218 с.
- Гуров, Е.П., Черненко, Ю.О., Ямиченко, А.Ю. (2010). Ударні та післяударні процеси при метеоритному кратероутворенні. *Звіт про НДР*, 94 с.
- Кукурудза, В.Д. (1991). Обобщение результатов ГГФ и геохимисследований, выполненных на Оболонской астроблеме с целью оценки перспектив НГ. *Отчет ВНИИ ПГО "Черниговнефтегазгеология"*.
- Краюшкин, В.А., Вакарчук, Г.И., Гальченко, В.А., Ключко, В.П., Листков, В.П., Лушпей, М.М., Слободян, В.П., Токовенко, В.С., Филишкин, К.К. (1994). Нефтегазовый потенциал астроблем Украины. Препр. АН Украины. Ин-т геол. наук, 93–4.
- Краюшкин В.А., Гуров, Е.П. (1989). К перспективе поиска нефти и газа в астроблемах Украины. *Геологический журнал*, 1, 17–27.
- Краюшкин, В.А., Гуров, Е.П. (1987). Научное обоснование нефтегазопоискового бурения на Оболонской астроблеме. *Геологический журнал*, 1, 17–27.
- Масайтис, В.Л., Данилин, А.Н., Карпов, Г.М., Райхлин, А.И. (1976). Оболонская и Ротмистровская астроблемы в Европейской части СРСР. *Докл. АН СССР*, 1, 174–177.
- Михайлов, В.А., Загнітко, В.М., Михайлова, Л.С. (2011). Перспективи газонасності сланцевих відкладів Бовтиської западини. *Зб. наук. праць ін-ту ім. Тютювського*, 35, 1 (2), 23–29.
- Михайлов, В.А., Зейкан, О.Ю., Коваль, А.М., Загнітко, В.М., Гуров, Е.П., Вижва, С.А., Шнюков, Є.Ф., Наумко, І.М., Чепіль, П.М., Кожушок, О.Д., Радченко, В.В., Безродний, Д.А. (2013). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України: Метан вугільних родовищ. Газогідрати, імпактні структури і наклади западини Українського щита. К.: Ніка-Центр, 368 с.
- Петровський, А.П. і др. (2014). Интегральное геолого-геофизическое моделирование Оболонской астроблемы в свете перспектив ее

нефтегазоносности. *Материалы 41-й сессии Международного научного семинара имени Д.Г. Успенского, ИГФ УрО РАН*, 189–191.

Рябенко, В.А., Вальтер, А.А., Гуров, Е.П. и др. (1982). Геология и петрология взрывных метеоритных кратеров. К.: Наук. думка, 228 с.

Donofrio, R.R. (1998). North American impact structures hold giant field potential. *Oil Gas Journal*, May 11, 69–83.

Ames Structure in Northwest Oklahoma and Similar Features: Origin and Petroleum Production (1995 Symposium). (1997). Circular 100, The University of Oklahoma Norman, 396 p.

Penfield, G.T., Camargo, A.Z. (1981). Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetics and gravity (abstract). *Society of Exploration Geophysicists, 51st Annual International Meeting*, 37.

Sawatzky, H.B. (1974). Astroblems in the Williston Basin, 23–38.

Westbroek, H.H., Stewart, R.R. (1996). The formation, morphology, and economic potential of meteorite impact craters. *CREWES Research Report Meteorite impact craters*, 8, 34–1 – 34–26.

References

Ames Structure in Northwest Oklahoma and Similar Features: Origin and Petroleum Production (1995 Symposium). (1997). Circular 100, The University of Oklahoma Norman, 396 p.

Bahrii, I.D. (2018). Naftohazonosnist impactnykh struktur Ukrainy. Kyiv–Chernivtsi: Bukrek, 503 p. [in Ukrainian]

Bahrii, I.D., Alokhin, V.I., Dubosarskiy, V.R., Pochtarenko, V.I., Semeniuk, V.H., Hafich, I.P., Laktionov, I.S. (2017). Spetsialni metody v heolohii. Pokrovsk: DVNZ "DoNTU", 215 p. [in Ukrainian]

Bahrii, I.D., Pochtarenko, V.I., Dubosarskiy, V.R., Yantsevych, O.O., Semeniuk, V.H., Hryha, M.V., Malyshev, O.M., Hafych, I.P. (2016). Heolohostruktorno-heokhimichni osoblyvosti formuvannia rodovyskh horiuchykh slantsiv ta vuhlevodnykh pokladiv Bovtyskoi impactnoi struktury. *Geological journal*, 17–42. [in Ukrainian]

Bass, Yu.B., Galaka, A.I., Grabovskiy, V.I. (1967). Boltyishskie goryuchie slantsyi. *Razvedka i ohrana nedr*, 9, 11–15. [in Russian]

Galaka, A.M. et al. (1955). Otchet o rezultatah geologoposkovykh rabot v rayone Boltyishskoy depressii (po rabotam Petrikovskoy partii) za 1953–54 gg. Fondy NVP "GeolInform Ukraina". [in Russian]

Golubev, V.A., Karpov, G.M., Popovichenko, V.A. (1974). Pro meteoritno-vibuhove pohodzhennya Bovtyskoyi zapadiny na Kirovogradshini. *Dop. AN URSSR. Ser. B*, 1, 10–12. [in Russian]

Grabovskiy, V.K., Rizdvianskiy, K.F., Solodovnichenko, A.P., Shendrinskaya, G.A. (1970). Otchet o predvaritelnoy razvedke Boltyishskogo mestorozhdeniya goryuchih slantsev 1967–1969 gg. (Kirovogradskaya i Cherkasskaya obl. USSR). K.: Fondy NVP "GeolInform Ukraina". [in Russian]

Grieve, R.A.F., Reni, G., Gurov, E.P., Ryabenko, V.A. (1987). The melt rocks of the Boltysh impact crater Ukraine USSR. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 96, 56–62.

Gurov, E.P., Chernenko, I.O., Yamnychenko, A.I. (2010). Udarni ta pislia udarni protsesy pry meteorytnomu krateroutvorenni. *Zvit pro NDR*, 94 p. [in Ukrainian]

Gurov, E.P., Gozhik, P.F. (2006) Impaktnoe krateroobrazovanie v istorii Zemli. NTP "Naftogaz-prognoz". 218 p. [in Ukrainian]

Kukurudza, V.D. (1991). Obobshcheniye rezultatov GGF i geokhimissledovaniy. voplnennykh na Obolonskoy astrobleme s tselyu otsenki perspektiv NG. *Otchet VNII PGO "Chernigovneftegazgeologiya"*. [in Russian]

Krayushkin V.A., Gurov, E.P. (1989). K perspektive poiska nefi i gaza v astroblemah Ukrainyi. *Geological journal*, 1, 17–27. [in Russian]

Krayushkin, V.A., Vakarchuk, G.I., Galchenko, V.A., Klochko, V.P., Listkov, V.P., Lushpey, M.M., Slobodyan, V.P., Tokovenko, V.S., Filyushkin, K.K. (1994). Neftegazoviy potentsial astroblem Ukrainyi. Prepr. AN Ukrainy. In-t geol. nauk, 93–4. [in Russian]

Krayushkin, V.A., Gurov, E.P. (1987). Nauchnoe obosnovanie neftegazoposkovogo bureniya na Obolonskoy astrobleme. IGN AN USSR. [in Russian]

Masaytis, V.L., Danilin, A.N., Karpov, G.M., Rayhlin, A.I. (1976). Obolonskaya i Rotmistrovskaya astroblemy v Evropeyskoy chasti SSSR. *Dokl. AN SSSR. № 1*. S. 174–177. [in Russian]

Mykhailov, V.A., Zahnitko, V.M., Mykhailova, L.S. (2011). Perspektivy hazonosnosti slantsevyykh vidkladih Bovtyskoi zapadyny. Zb. nauk. prats in-tu im. Tutkovskoho, 35, 1 (2), 23–29. [in Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Zeikan, O.I., Koval, A.M., Zahnitko, V.M., Hurov, Ye.P., Vyzhva, S.A., Shniukov, Ye.F., Naumko, I.M., Chepil, P.M., Kozhushok, O.D., Radchenko, V.V., Bezrodnyi, D.A. (2013). Netradytsiini dzherela vuhlevodiv Ukrainy: Metan vuhilnykh rodovyskh. Hazohidraty, impaktni struktury i nakladieni zapadyny Ukrainskoho shchytia. K.: Nika-Tsentr. 368 p. [in Ukrainian]

Penfield, G.T., Camargo, A.Z. (1981). Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetics and gravity (abstract). *Society of Exploration Geophysicists, 51st Annual International Meeting*, 37.

Petrovskiy, A.P. et al. (2014). Integralnoe geologo-geofizicheskoe modelirovanie Obolonskoy astroblemy v svete perspektiv ee neftegazonosnosti. *Materialy 41-y sessii Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara imeni D.G. Uspenskogo, IGF Uro RAN*, 189–191.

Ryabenko, V.A., Valter, A.A., Gurov, E.P. et al. (1982). Geologiya i petrologiya vzyryvnykh meteoritnykh kraterov. K.: Nauk. dumka., 228 p. [in Russian]

Sawatzky, H.B. (1974). Astroblems in the Williston Basin, 23–38.

Westbroek, H.H., Stewart, R.R. (1996). The formation, morphology, and economic potential of meteorite impact craters. *CREWES Research Report Meteorite impact craters*, 8, 34–1 – 34–26.

Надійшла до редколегії 30.11.22

I. Bagriy, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,

E-mail: bagrid@ukr.net,

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine,

55-B O. Honchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine;

I. Hafych, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Director,

E-mail: gafichip@dtck.com,

Naftogaz LLC, 9-D Simiy Hohlovyy Str., Kyiv, 04119, Ukraine;

S. Payuk, Head,

E-mail: golova@dkz.gov.ua,

State Commission of Ukraine on Mineral Reserves,

18/7 Almazova Str., of. 816, Kyiv, 01133, Ukraine;

E. Solodkyi, Cand. Sci. (Geol.), Head of the exploration department,

E-mail: solodkiyev@dtck.com,

Naftogaz LLC, 9-D Simiy Hohlovyy Str., Kyiv, 04119, Ukraine;

K. Yaroshovets-Baranova, PhD Student,

E-mail: katerina.yaroshovetseo_33@ukr.net,

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine,

55-B O. Honchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine

PROSPECTS FOR EXTRACTION OF ENERGY RESOURCES IN ASTROBLEMS OF UKRAINE

Analysis of the results of complex studies of the structure and prospects of oil and gas bearing impact structures (astroblems) of Ukraine are based on the introduction of the latest technologies and equipment complexes. The purpose of the research is to assess the prospects for the production of energy resources in the astroblems of Ukraine (hydrocarbons, oil shale, brown coal, hydrogen, helium) according to the STHAGC. The paper is based on the factual material made up of the results of many years of field surveys performed according to the integrated practice of structural, thermal, hydrological, atmogeochemical surveys (STHAGC) of the impact structures. This technique has proved successful as a practical tool for prospecting of mineral reserves (hydrocarbons, underground waters) and solution of ecological problems in various regions of Ukraine (the land and water areas of the Black Sea and the Sea of Azov).

Impact structures (astroblems) should be regarded as non-traditional sources of the energy feedstock, namely, oil and gas. Prospecting and operation of these sources will permit to significantly enlarge the energy potential within the shortest time and strengthen the national security of the country. The main targets of the surveys performed by the monograph authors were the following impact structures in Ukraine: Bovtyska and Obolonska. The Bovtyska structure is proposed as a primary object for purposeful geological exploration.

Keywords: astroblem, impact structure, hydrogen, hydrocarbon, helium, Obolonska impact structure, Bovtyska impact structure.

УДК 553:332.122.5(477)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.12>

Л. Горошкова, д-р. екон. наук, проф.,
E-mail: goroshkova69@gmail.com,
Національний університет "Києво-Могилянська академія",
вул. Г. Сковороди, 2, м. Київ, 04655, Україна;
О. Меньшов, д-р геол. наук, ст. дослідник,
E-mail: menshov.o@ukr.net,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ВИДОБУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ НЕРУДНИХ КОРИСНИХ КОПАЛИН ДЛЯ БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ

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

Проведено моделювання з метою формування системи управління раціональним видобуванням та використанням мінерально-сировинних ресурсів України на прикладі нерудних корисних копалин для будівництва і забезпечення умов повоєнного відновлення країни. Запропоновано прогностичні обсяги щодо видобутку та раціонального використання формувати з урахуванням потреб технологічно споріднених галузей. Проведено аналіз офіційних статистичних даних щодо обсягів видобутку каміння будівельного, піску будівельного та сировини керамзитової впродовж дослідженого періоду (15 р.) і встановлено, що коливання показників як за обсягами видобутку, так і за темпами їх зростання мають періодичний, циклічний характер, вони корелюються між собою та пов'язані із загальноекономічним станом будівельної галузі та країни. Доведено, що вирішити проблему раціонального використання корисних копалин можливо шляхом більш збалансованого їх видобутку, а саме встановлення кореляції між видобутком та обсягами використання. Для прогнозування розвитку галузі використано авторську економіко-математичну модель прогнозування розвитку складних систем. Доведено, що така модель дозволить управляти обсягами видобутку технологічно споріднених корисних копалин у взаємозалежності від обсягів їх використання.

Доведено, що в умовах війни внаслідок руйнування інфраструктури країни існує необхідність внесення коректив у модель для збалансованого видобутку та використання нерудних корисних копалин для будівництва з урахуванням утворених будівельних відходів та потреб повоєнного відновлення країни та її інфраструктури. Проведено моделювання з урахуванням нових умов розвитку галузі й країни, сформовано прогноз на п'ятирічний період щодо видобутку та використання піску будівельного, каміння будівельного та сировини керамзитової.

Ключові слова: мінерально-сировинна база, нерудні корисні копалини для будівництва, будівельний камінь, пісок, керамзитова сировина, прогнозування, моделювання, управління.

Постановка проблеми. Наслідками бойових дій на території України є руйнування інфраструктури. Станом на середину 2022 р. збитки вражаючі: втрачено понад 6,3 тис. км колій залізниці, пошкоджено 23,5 тис. км автодоріг, 289 автомобільних та 41 залізничних мостів; зруйновано чи пошкоджено 35,2 млн квадратних метрів житла, майже 1 тис. закладів, пошкоджено та знищено понад 30 нафтобаз, завдані руйнування великим підприємствам Донецької, Запорізької, Дніпропетровської області; пошкоджена енергетична інфраструктура країни. Отже, повоєнне відновлення країни, відбудова зруйнованих населених пунктів та інфраструктури призведе до підвищення попиту будівельної індустрії на матеріали, сировину та корисні копалини для будівництва. Водночас слід враховувати деградацію земель (Dindaroglu, 2021; Меньшов, 2016). Саме тому розвиток надрокористування є надважливим для обороноздатності країни та відновлення її економіки у повоєнний час. Україна має потужний потенціал для того, щоб забезпечити зростаючі потреби у корисних копалинах для будівництва. Країна займає одне з провідних місць у світі за запасами корисних копалин як на одного мешканця, так і за обсягами їх видобутку, щороку тут видобувається до 4 % світових обсягів мінеральної сировини (Лисенко, 2017). За таких умов важливим є формування системи раціонального видобутку та використання корисних копалин з урахуванням потреб у країні та принципів раціонального надрокористування. Увага саме до корисних копалин для будівництва, а саме, каменю будівельного, піску будівельного та сировини керамзитової, зумовлена важливістю їх для будівельної галузі, особливо для відновлення зруйнованої та пошкодженої інфраструктури в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам геологічного вивчення надр, надрокористування, зокрема економічних аспектів, присвячені роботи А.В. Бодюка,

С.О. Довгого, М.М. Коржнева, М.М. Костенко, Є.О. Куліша, М.В. Курило, О.А. Лисенка, В.А. Михайлова, В.С. Міщенко та ін. (Бордюк, 2013; Довгий та ін., 2007; Коржнев та ін., 2006; Лисенко та ін., 2017; Михайлов та ін., 2006).

У Державному балансі запасів корисних копалин України станом на 01.01.2020 р. обліковано 944 родовища, у тому числі 176 об'єктів обліку будівельного каменю. Розробляються 464 родовища, у тому числі 120 об'єктів обліку. За останні роки збільшилась кількість дрібних родовищ із запасами до 10000 тис. м³, які головним чином розробляються комерційними структурами. Родовища розташовані у більшості областей України, найбільша кількість – у Житомирській, Вінницькій, Кіровоградській, Тернопільській, Рівненській, Закарпатській, Черкаській, Запорізькій, Миколаївській областях (Примушко та ін., 2020).

На сьогодні відомо понад 900 родовищ та проявів піску будівельного. Станом на 01.01.2020 року у Державному балансі запасів корисних копалин України враховано 652 родовища піску будівельного, у т. ч. 37 об'єктів обліку. У промисловій розробці перебувають 240 родовищ, у т. ч. 19 об'єктів обліку. Родовища розташовані у більшості областей України, найбільша кількість – у Київській, Львівській, Тернопільській, Житомирській, Вінницькій, Кіровоградській, Рівненській, Черкаській, Миколаївській областях (Примушко та ін., 2020).

Родовища керамзитової сировини розташовані майже в усіх регіонах України, у Державному балансі запасів корисних копалин України станом на 01.01.2020 р. обліковано 53 родовища керамзитової сировини, із них 19 комплексних родовищ, з яких 6 – об'єкти обліку. На сьогодні різними підприємствами розробляються 6 родовищ, із них 3 комплексних родовища – об'єкти обліку (Примушко та ін., 2020).



Рис. 1. Динаміка темпів зростання обсягів видобутку каменю будівельного, піску будівельного та сировини керамзитової в 2004–2019 рр.

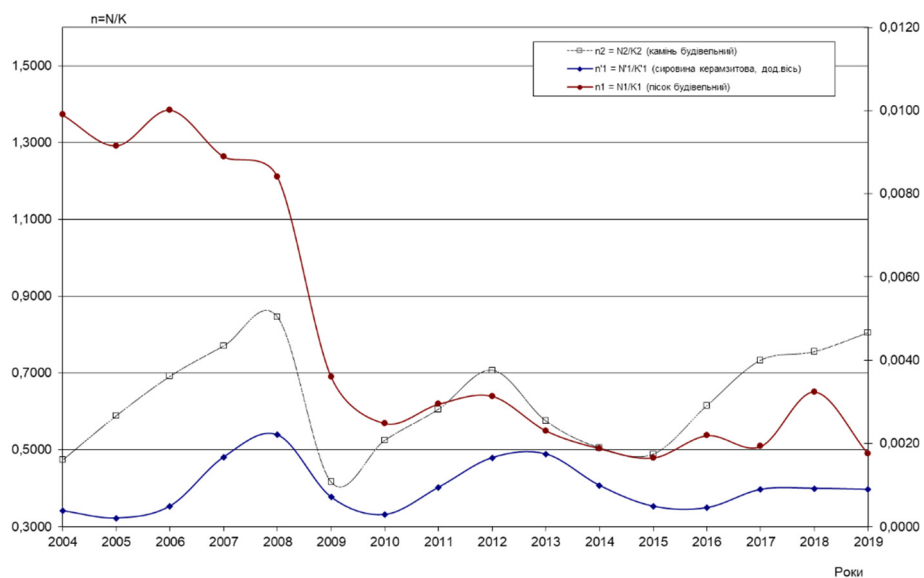


Рис. 2. Динаміка базисних темпів зростання обсягів видобутку піску будівельного, сировини керамзитової і каменю будівельного в 2004–2019 рр.

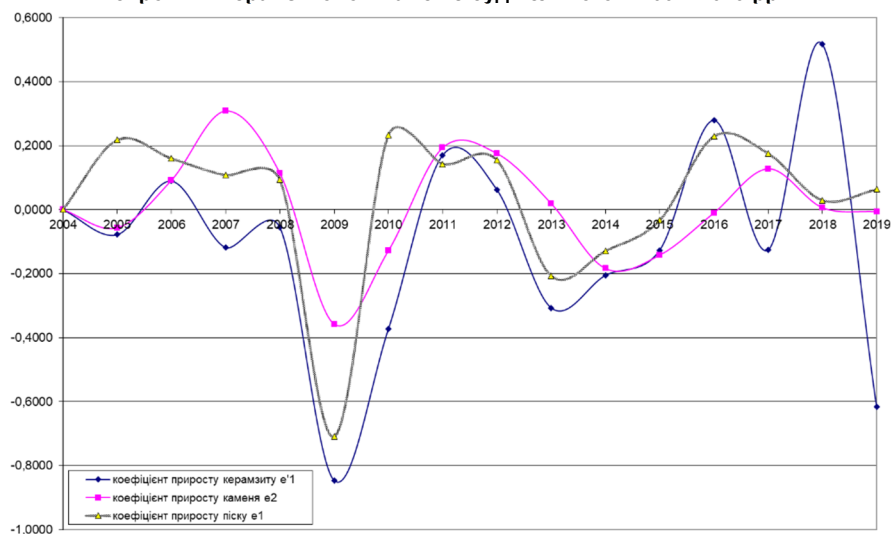


Рис. 3. Динаміка коефіцієнтів приросту видобутку піску будівельного, сировини керамзитової і каменю будівельного за умови відсутності взаємозв'язку

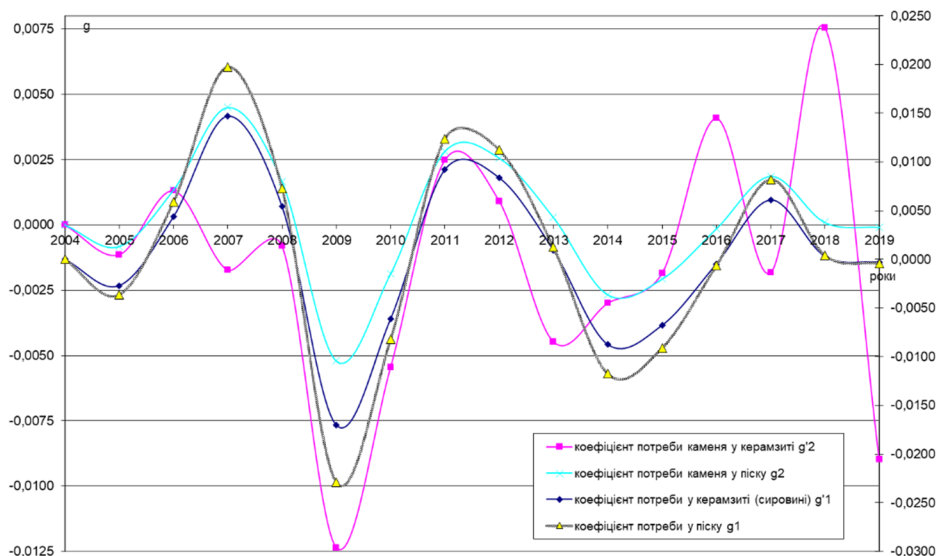


Рис. 4. Динаміка коефіцієнтів потреби у видобутку піску будівельного, сировини керамзитової і каменю будівельного

З використанням системи рівнянь (1) знайдено залежності коефіцієнта приросту видобутку сировини керамзитової $\lambda_1(t) = \varepsilon_1(t) + \gamma_1(t)N_2(t)$; коефіцієнта приросту видобутку каменю будівельного залежно від обсягів видобутку сировини керамзитової $\lambda_2(t) = \varepsilon_2(t) + \gamma_2(t)N_1(t)$; коефіцієнта приросту видобутку піску будівельного

$\lambda_1(t) = \varepsilon_1(t) + \gamma_1(t)N_2(t)$; коефіцієнта приросту видобутку каменю будівельного від обсягів видобутку піску будівельного $\lambda_2(t) = \varepsilon_2(t) + \gamma_2(t)N_1(t)$ за умови наявності взаємозв'язку (рис. 5).

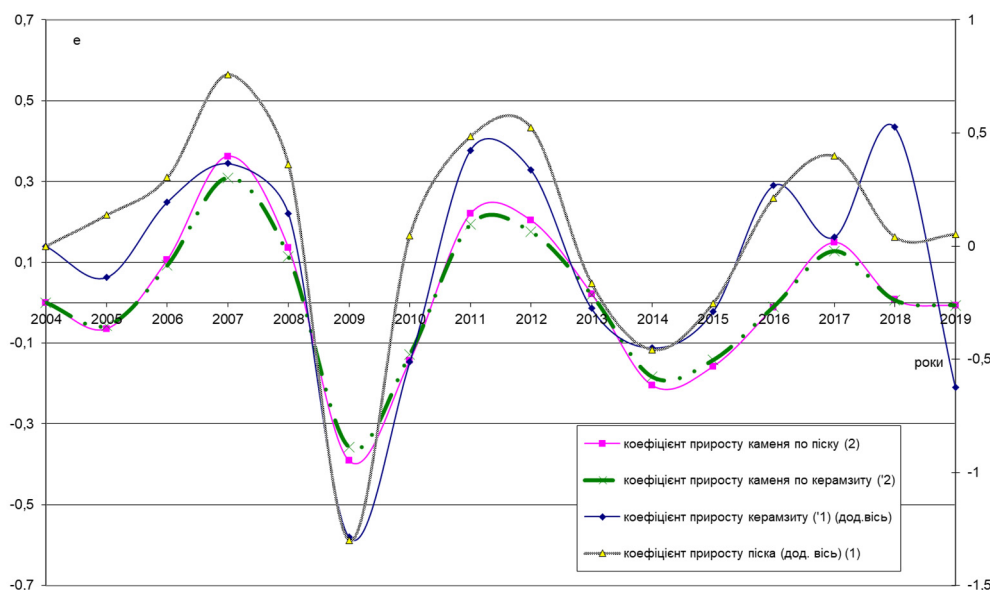


Рис. 5. Динаміка коефіцієнтів приросту видобутку піску будівельного, сировини керамзитової і каменю будівельного за наявності взаємозв'язку

Такий підхід був раціональним в умовах довоєнного часу. В умовах повоєнного відновлення України цей підхід на певний час доцільно змінити з таких причин. З початком війни внаслідок руйнування інфраструктурних об'єктів вже утворилась досить велика кількість будівельного сміття, але це сміття не є традиційним. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, лише на деокупованих територіях Київської, Чернігівської та Сумської областей від руйнувань будівель та споруд через дії РФ утворилося близько 15,2 млрд тонн відходів. Отже, вже сьогодні є нагальна проблема – створення додаткових сміттєзвалищ, оскільки площі наявних полігонів буде недостатньо. Задля зменшення негативних наслідків (додаткового

відведення земель та екологічних наслідків) доцільно знайти можливості, щоб ці полігони мали тимчасовий характер: звозити на них створене під час війни будівельне сміття, сортувати на те, що придатне і непридатне для повторного використання у будівництві. Наприклад, не може бути використане повторно термодетформоване сміття та азбест – їх необхідно утилізувати. У той же час серед сміття є традиційні будівельні відходи: металева сітка, металопластик, скло, стінові матеріали і т. ін. – те, що можливо повторно використати. Задля подальшої переробки і використання у будівництві потрібне сортування і ретельне дослідження цих матеріалів на придатність для використання. Будівельні залишки можуть бути використані для виробництва будівельної продукції –

підсипки під дороги (замість щебеню і гальки), для виготовлення бетону низьких марок, виробничі потужності для такого виробництва в Україні наявні. Відповідний досвід у світі існує – це передусім відновлені після Другої світової війни міста Європи. Крім того, на сьогодні в багатьох країнах використання будівельного сміття в новому будівництві взагалі є обов'язковим, це стосується Данії, Нідерландів, Німеччини та ін. Отже потрібно здійснити прогнозування обсягів видобутку піску будівельного, каменю будівельного і сировини керамзитової з урахуванням наслідків війни. Після їх подолання доцільно буде повернутись до запропонованої збалансованої моделі.

З урахуванням вищевикладеного доцільно буде зменшити обсяги видобутку каменю будівельного та керамзитової сировини. У той же час видобуток піску доцільно збільшити, оскільки, по-перше, його не замінить будівельне сміття, по-друге – внаслідок руйнування інфраструктури активізується будівництво з метою її відновлення. Зважаючи на наведені вище міркування, ми здійснили прогнозування на п'ятирічний період обсягів видобутку перелічених корисних копалин з урахуванням динаміки зміни обсягів видобутку впродовж 2004–2019 рр. (рис. 6).

З використанням даних Державної служби статистики України (Статистичний щорічник України) було проведено аналіз, моделювання і прогнозування виробництва такої промислової продукції: піски природні; галька, гравій, щебінь та камінь дроблений; утворення будівельних відходів.

Алгоритм дослідження був аналогічний до попереднього. Були оцінені темпи зростання виробництва пісків природних; гальки, гравію, щебеню та каменю дробленого; утворення будівельних відходів. Графічно

результати представлено на рис. 7. Впродовж дослідженого періоду відбувалися коливання показників темпів зростання виробництва (максимуми і мінімуми), які відповідають малим циклам економічного розвитку тривалістю 4–5 років. На рис. 8 наведено отримані базисні темпи зростання пісків природних; гальки, гравію, щебеню та каменю дробленого; утворення будівельних відходів. Тенденції збігаються з отриманими раніше для ланцюгових темпів зростання (рис. 7).

На рис. 9 наведено отримані залежності коефіцієнтів приросту виробництва пісків природних; гальки, гравію, щебеню та каменю дробленого; утворення будівельних відходів без урахування взаємозв'язку між обсягами виробництва (для кожного окремо).

На рис. 10 наведено результати розрахунків коефіцієнтів приросту потреби у виробництві пісків природних; гальки, гравію, щебеню та каменю дробленого; утворення будівельних відходів

З використанням системи рівнянь (1) знайдено залежності коефіцієнта приросту виробництва пісків природних; гальки, гравію, щебеню та каменю дробленого; утворення будівельних відходів за умови наявності взаємозв'язку (рис. 11).

Окремо було проаналізовано ситуацію щодо утворення і поводження з будівельними відходами в Україні (рис. 12). Аналіз показав, що останніми роками збільшувались обсяги утворення будівельних відходів з одночасним зменшенням обсягів утилізації і вивезення у спеціально відведені місця. Отже, це свідчить про позитивні тенденції щодо можливості повторного використання певних видів будівельного сміття (відходів) в Україні впродовж 2018–2020 рр.

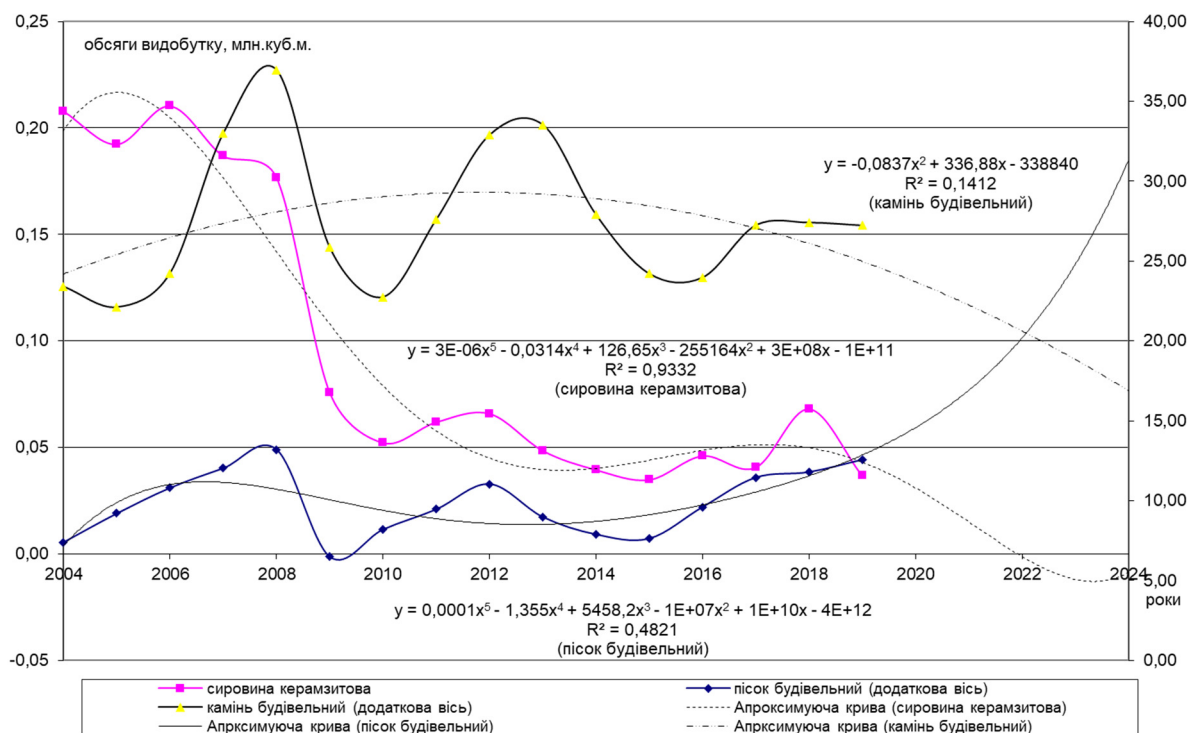


Рис. 6. Прогнозування обсягів видобутку каменю будівельного, піску будівельного та сировини керамзитової на період до 2024 р.

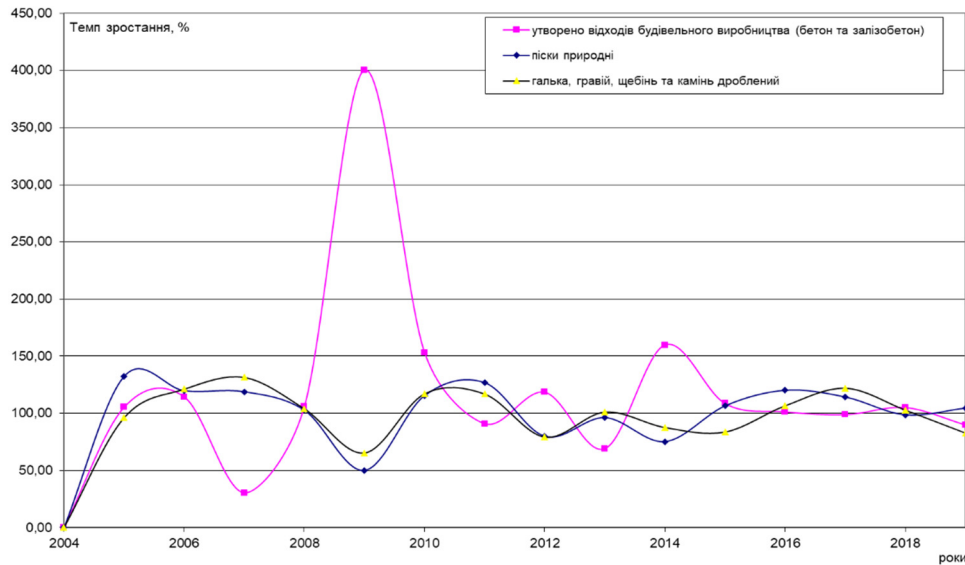


Рис. 7. Динаміка темпів зростання обсягів виробництва гальки, гравію, каменю дробленого, пісків природних та обсягів утворення відходів будівельного виробництва в 2004–2019 рр.

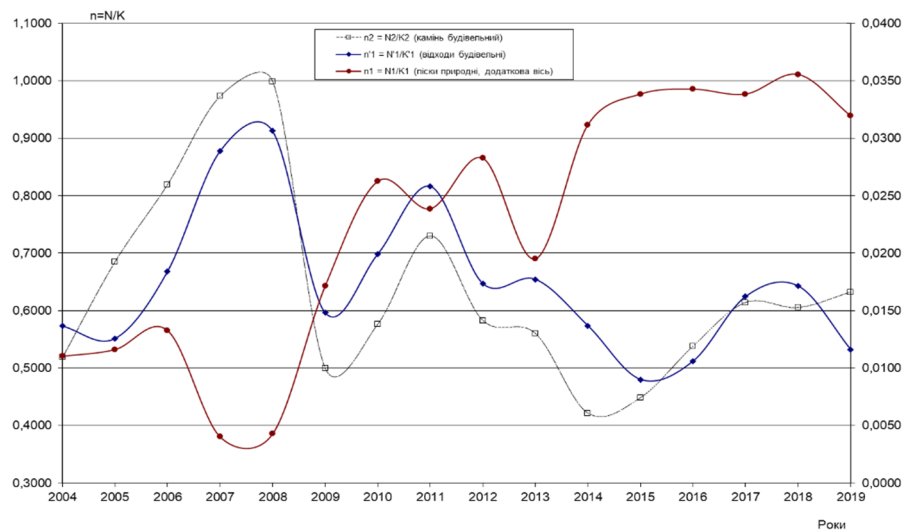


Рис. 8. Динаміка базисних темпів зростання обсягів виробництва гальки, гравію, каменю дробленого, пісків природних та обсягів утворення відходів будівельного виробництва в 2004–2019 рр.

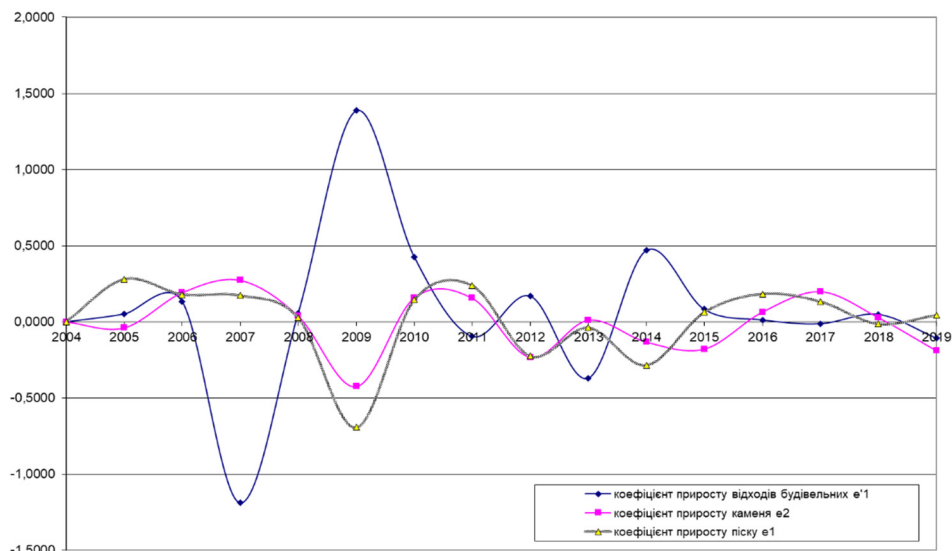


Рис. 9. Динаміка коефіцієнтів приросту виробництва гальки, гравію, каменю дробленого, пісків природних та обсягів утворення відходів будівельного виробництва в 2004–2019 рр.

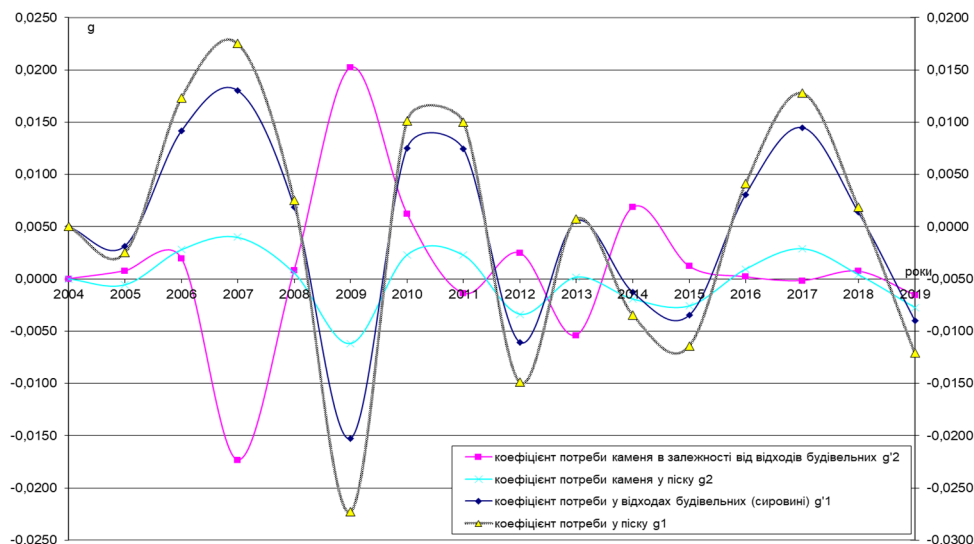


Рис. 10. Динаміка коефіцієнтів потреби у виробництві гальки, гравію, каменю дробленого, пісків природних та обсягів утворення відходів будівельного виробництва в 2004–2019 рр. за відсутності взаємозв'язку

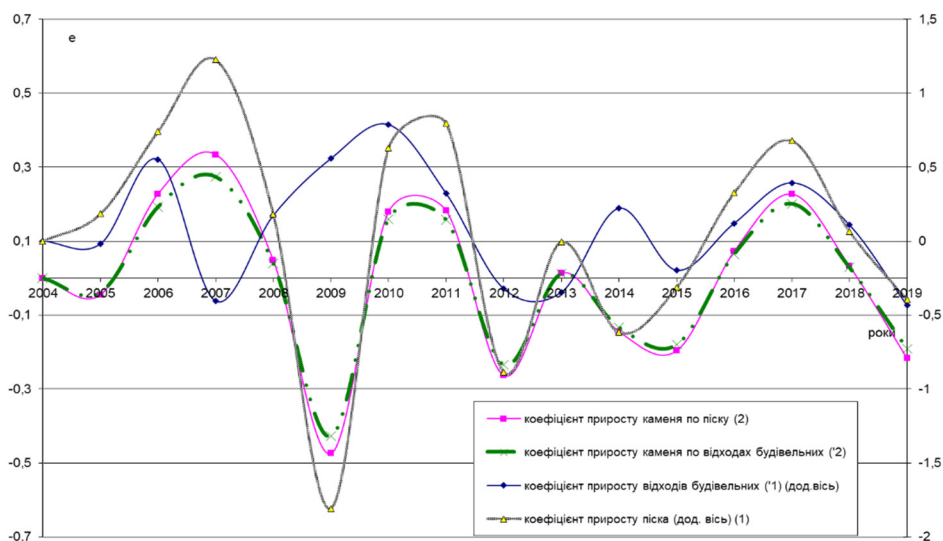


Рис. 11. Динаміка коефіцієнтів приросту виробництва гальки, гравію, каменю дробленого, пісків природних та обсягів утворення відходів будівельного виробництва в 2004–2019 рр. за наявності взаємозв'язку

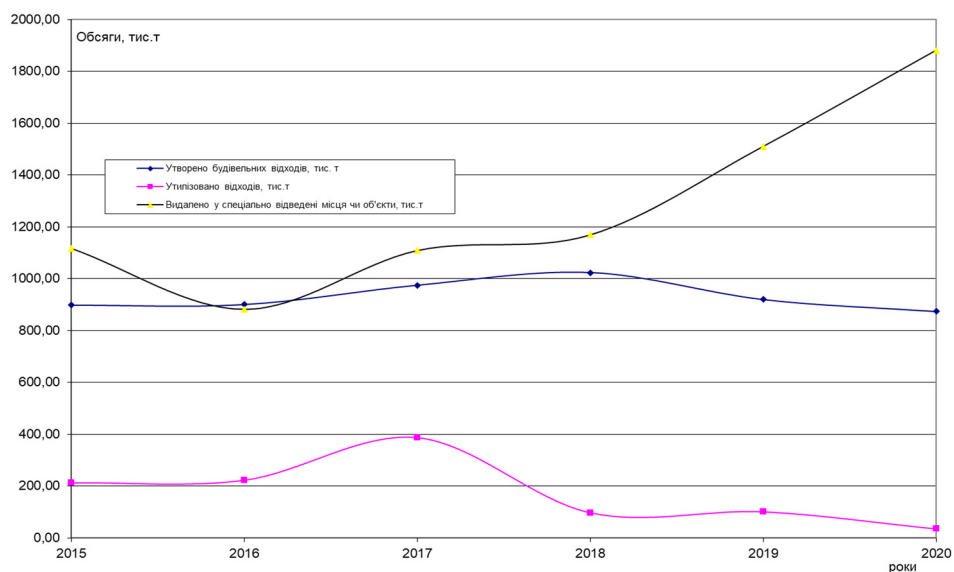


Рис. 12. Динаміка обсягів утворення будівельних відходів, їх утилізації та видалення у спеціально відведені місця в 2004–2020 рр.

З урахуванням наведених вище міркувань щодо ситуації з утворенням будівельних відходів під час війни ми здійснили прогнозування на п'ятирічний період обсягів виробництва гальки, гравію, каменю дробленого; пісків природних та обсягів утворення відходів будівельного виробництва з урахуванням динаміки зміни обсягів впродовж 2004–2019 рр. (рис. 13). П'ятирічний період визначений для

прогнозування саме тому, що будівельні відходи, утворені під час війни, необхідно буде використати в найкоротші терміни – принаймні до 2024 р., оскільки у разі їх невикористання за цей період виникне необхідність створення додаткових полігонів для їх зберігання і пошуків інших шляхів для утилізації.

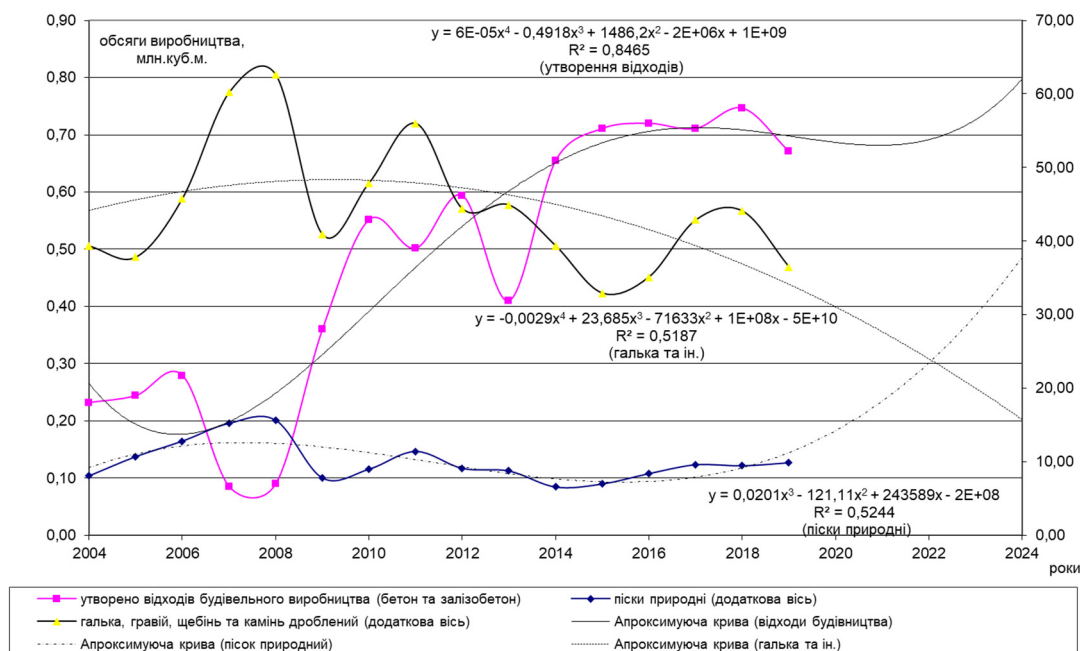


Рис. 13. Прогнозування обсягів виробництва гальки, гравію, каменю дробленого, пісків природних та обсягів утворення відходів будівельного виробництва на період до 2024 р.

При прогнозуванні враховано доцільність збільшення обсягів виробництва піску природного, зменшення потреб у виробництві гальки, гравію, каменю дробленого з одночасним зростанням обсягів утворення будівельних відходів унаслідок руйнування інфраструктури в Україні. Після 2024 р. потрібно буде корегувати модель, оскільки, як сподіваємось, нового будівельного сміття внаслідок руйнувань не утвориться, і можливо буде повернутись до збалансованої моделі взаємопов'язаного між собою видобутку корисних копалин для будівництва (умови довоєнного періоду).

В обох випадках прогнозовано зростання обсягів видобутку пісків будівельних (пісків природних). На нашу думку, забезпечити зростаючі потреби у піску можливо шляхом одночасного розв'язання ще однієї інфраструктурної проблеми для України – активізації використання річкового транспорту. З початком війни внаслідок блокування РФ Чорного моря, для транспортування вантажів використовувались Румунські порти (Констанца) та перевезення річкою Дунай (гирло Суліна). На жаль, Дунайські порти України (Рені, Ізмаїл, Усть-Дунайськ) внаслідок зменшення глибин не використовуються на повну потужність (передусім гирло Бистре). Отже, існує можливість одночасного вирішення низки важливих проблем – поглиблення судноплавних шляхів з одночасним використанням добутого річкового піску для потреб будівництва та розв'язання екологічної проблеми – використання видобутого піску. Розробка системного підходу в масштабах України щодо відновлення річкового судноплавства до проєктних потужностей портів вирішить проблеми транспортної логістики з одночасним уникненням екологічних

проблем від піску, видобутого в результаті днопоглиблювальних робіт. Такий підхід до формування мережі логістичної інфраструктури обґрунтований у роботах (Сумець, Горошкова, 2022а, б).

Висновки і рекомендації. Проведено моделювання та запропоновано модель збалансованого видобутку та використання нерудних корисних копалин для будівництва. Запропоновано прогнозні обсяги щодо видобутку та раціонального використання формувати з урахуванням потреб технологічно споріднених галузей.

Проведено аналіз офіційних статистичних даних щодо обсягів видобутку каменю будівельного, піску будівельного та сировини керамзитової впродовж дослідженого періоду (15 р.) і встановлено, що коливання показників як за обсягами видобутку, так і за темпами їх зростання мають періодичний, циклічний характер, вони корелюються між собою та пов'язані із загальноекономічним станом будівельної галузі та країни. Доведено, що вирішити проблему раціонального використання корисних копалин можливо шляхом більш збалансованого їх видобутку, а саме встановлення кореляції між видобутком та обсягами використання. Для прогнозування розвитку галузі використано авторську економіко-математичну модель прогнозування розвитку складних систем. Доведено, що така модель дозволить управляти обсягами видобутку технологічно споріднених корисних копалин у взаємозалежності від обсягів їх використання.

Доведено, що в умовах війни внаслідок руйнування інфраструктури країни існує необхідність внесення коректив у модель для збалансованого видобутку та використання нерудних корисних копалин для будівництва

з урахуванням утворених будівельних відходів та потреб повоєнного відновлення країни та її інфраструктури. Проведене моделювання з урахуванням нових умов розвитку галузі у країні, сформований прогноз на п'ятирічний період щодо видобутку та використання піску будівельного, каменю будівельного та сировини керамзитової. Обґрунтовано доцільність зменшення видобутку сировини керамзитової та каменю будівельного з одночасним збільшенням обсягів видобутку піску будівельного та визначені додаткові джерела забезпечення зростаючих потреб у піску з урахуванням ресурсозбереження та мінімізації екологічних наслідків видобування. Доведено, що після використання у будівництві будівельного сміття доцільно буде повернутись до моделі збалансованого видобутку корисних копалин для будівництва.

Подальших досліджень потребує проблема прогнозування обсягів можливого видобутку піску від днопоглиблювальних робіт у взаємозв'язку з потребами будівельної галузі.

Список використаних джерел

- Бодюк, А.В. (2013). Економіко-ресурсний аспект досліджень корисних копалин. *Формування ринкових відносин в Україні*, 12(151), 176–179.
- Волков, В.П., Горошкова, Л.А. (2013а). Спосіб прогнозування розвитку складних систем. *Патент 82983, МПК (2013.01) G06Q90/00; G06Q10/06 (2012.01)* (Україна). у 201301645; заявл. 11.02.2013 р.; опубл. 27.08.2013 р. *Бюлетень*, 16.
- Волков, В.П., Горошкова, Л.А. (2013б). Прогнозування розвитку складних техніко-економічних систем мезорівня. *Економічний вісник університету*, 20/2, 257–263.
- Волков, В.П., Горошкова, Л.А. (2014). Малі економічні цикли: теорія та вітчизняна практика. *Науковий вісник Ужгородського університету. Економіка*, 1 (42), 270–276.
- Волков В.П., Горошкова Л.А. (2018). Управління раціональним видобуванням та використанням мінерально-сировинних ресурсів України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(82), 25–35.
- Горошкова, Л.А. (2011). Економічна циклічність розвитку металургійної та забезпечуючих галузей. *Економічний вісник університету*, 17/2, 47–54.
- Довгий, С.О., Шестопапов, В.М., Коржнев, М.М. та ін. (2007). Реструктуризація мінерально-сировинної бази України та її інформаційне забезпечення. К.: Наукова думка.
- Закон України "Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року". (2011). № 4731-VI від 17.05.2012 р. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*, 44, 457.
- Коржнев, М.М., Михайлов, В.А., Міщенко, В.С. та ін. (2006) Основи економічної геології. Навч. посібник. К.: Логос.
- Костенко, М.М. (2014). Мінерально-сировинна база України. Стаття 3. Стан мінерально-сировинної бази неметалічних корисних копалин України та основні напрями геологорозвідувальних робіт. *Мінеральні ресурси України*, 4, 6–13.
- Лисенко, О.А. (2017). Геолого-економічна оцінка корисних копалин (актуальні питання й методичні аспекти). *Мінеральні ресурси України*, 3, 22–26.
- Лисенко, О.А., Василенко, А.П., Костенко, М.М. (2017). Геологія рудних і нерудних корисних копалин – важливий напрям наукових досліджень Українського державного геологорозвідувального інституту. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*, 2, 20–32.
- Лустюк, М.Г., Дякон, В.М., Петрина, М.Л. (2013). Математична модель оцінки запасів корисних копалин. *Науковий вісник НГУ*, 5, 5–10.
- Меньшов, О.І. (2016). Застосування магнітних методів для контролю змін продуктивних земель. *Геофізичний журнал*, 38(4), 130–137.
- Михайлов, В.А., Віноградов, Г.Ф., Курило, М.В. та ін. (2007). Неметалічні корисні копалини України. Підручник. К.: ВПЦ "Київський університет".
- Положення про порядок проведення державної експертизи та оцінки запасів корисних копалин. (2002). Постанова КМ України від 22.12.1994 р., № 865 (зі змінами і доповненнями, внесеними постановою КМУ від 27.08.1997 р. № 927, від 04.10.2000 № 1512, від 25.10.2002 № 1595). <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/865-94-%D0%BF>
- Приймушко, С.І., Білошанська, Т.Д., Величко, В.Ф. (Ред.). (2020). Мінеральні ресурси України. К.: ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України".
- Сумець, О.М., Горошкова, Л.А. (2022а). Евентуальна модель для визначення локації логістичних об'єктів соціально-економічного розвитку територій регіонального рівня. *Економічний вісник Університету Григорія Сковороди в Переяславі*, 53, 139–152.
- Сумець, О.М., Горошкова, Л.А. (2022б). Практика застосування евентуальної моделі для визначення місця положення об'єктів логістичної інфраструктури України та її регіонів. *Економічний вісник Університету Григорія Сковороди в Переяславі*, 53, 152–170.
- Dindaroglu, T., Tunguz, V., Babur, E., Menshov, O., Battaglia, M.L. (2021). Determination of the relationship among compound Topographic Index (CTI), soil properties and land-use in karst ecosystems. *Physical Geography*, 1–23.
- Horoshkova, L., Khlobystov, Ie., Volkov, V. (2019). Prognostic model of mineral resources development in Ukraine. European Association of Geoscientists & Engineers. Source. *Conference Proceedings "Monitoring 2019"*, Nov 2019, Vol. 2019, 1–5.

References

- Dindaroglu, T., Tunguz, V., Babur, E., Menshov, O., Battaglia, M. L. (2021). Determination of the relationship among compound Topographic Index (CTI), soil properties and land-use in karst ecosystems. *Physical Geography*, 1–23.
- Lysenko, O.A. (2017). Geology-economical estimation of minerals (pressing questions and methodical aspects). *Mineral resources of Ukraine*, 3, 22–26. [in Ukrainian].
- Law of Ukraine "On claim of the National program of development of raw mineral-material base of Ukraine on a period to 2030". (2011). № 4731-VI from 17.05.2012. *List of Supreme Soviet of Ukraine*, 44, 457. [in Ukrainian]
- Lysenko, O.A., Vasilenko, A.P., Kostenko, M.M. (2017). Geology of ore and non-metallic minerals is important direction of scientific researches of the Ukrainian state geological survey institute. *Collection of scientific works of UkrSGRI*, 1–2, 20–32. [in Ukrainian]
- Korzhnev, M.M., Mykhailov, V.A., Mischenko, B.S. et al. (2006). Bases of economic geology. K.: Logos. [in Ukrainian]
- Menshov, O.I. (2016). Magnetic method applying for the control of productive land degradation. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(4), 130–137.
- Mykhailov, V.A., Vinogradov, H.F., Kurilo, M.V. et al. (2007). Industrial minerals and rocks of Ukraine. K.: VS of the Kyiv University. [in Ukrainian]
- Kostenko, M.M. (2014). A raw Mineral-material base of Ukraine. Article 3. State of raw mineral-material base of non-metal minerals of Ukraine and basic directions of geological survey works. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 6–13. [in Ukrainian]
- Dovhyi, O.V., Shestopalov, V.M., Korzhnev M.M. et al. (2007). Restructuring of raw mineral-material base of Ukraine and her dataware. K.: Naukova dumka [in Ukrainian]
- Bodiuk, A.B. (2013). Economical-recourse aspect of researches of minerals. *Forming of market relations in Ukraine*, 12 (151), 176–179. [in Ukrainian]
- Horoshkova, L.A. (2011). An economic recurrence of development of metallurgical and provide industries. *Collection of Scientific Articles "University Economic Bulletin"*, 17/2, 47–54. [in Ukrainian]
- Horoshkova, L., Khlobystov, Ie., Volkov, V. (2019). Prognostic model of mineral resources development in Ukraine. European Association of Geoscientists & Engineers. *Conference Proceedings "Monitoring 2019"*, Nov 2019, Vol. 2019, 1–5.
- Prymushko, S.I., Biloshapko, T.D., Velychka, V.F. (Eds.). (2017). Mineral resources of Ukraine. K.: State scientific and production enterprise the "State informative geological fund of Ukraine". [in Ukrainian]
- Lustiuk, M.H., Diakon, V.M., Petryna, M.L., Lustiuk M.H. (2013). Mathematical model of estimation of supplies of minerals. *Scientific announcer NGU*, 5, 5–10. [in Ukrainian]
- Regulations on State examination and evaluation of mineral recourse. (2002). Postanova KМУ Ukraine from 22.12.1994, № 865 (with changes and additions brought in by resolution of KМУ from 27.08.1997 № 927, from 04.10.2000 № 1512, from 25.10.2002 № 1595). <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/865-94-%D0%BF> [in Ukrainian]
- Sumets, O.M., Horoshkova, L.A. (2022a). A possible model for determining the location of logistical objects of socio-economic development of regional-level territories. *Economic Bulletin of the University of Grigory Skovoroda in Pereiaslav*, 53, 139–152. [in Ukrainian]
- Sumets, O.M., Horoshkova, L.A. (2022b). The practice of applying the eventual model to determine the location of the objects of the logistics infrastructure of Ukraine and its regions. *Economic Bulletin of the University of Grigory Skovoroda in Pereiaslav*, 53, 152–170. [in Ukrainian]
- Volkov, V.P., Horoshkova, L.A. (2018) Management of rational extraction and use of mineral resources of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(82), 25–35. [in Ukrainian]
- Volkov, V.P., Horoshkova, L.A. (2013b). Prognostication of development of the difficult technical-economical systems of mezelevel. *University Economic Bulletin*, 2/2, 257–263. [in Ukrainian]
- Volkov, V.P. Horoshkova, L.A. (2014). Small economic cycles: theory and home practice. *Scientific announcer of the Uzhhorod University. Economy*, 1 (42), 270–276. [in Ukrainian]
- Volkov, V.P., Horoshkova, L.A. (2013a). Method of prognostication of development of the difficult systems. *The patent 82983, MПК (2013.01) G06Q90/00; G06Q10/06 (2012.01)* (Ukraine). у 201301645; declared 11.02.2013; published 27.08.2013. *Bulletin*, 16. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 05.01.23

L. Horoshkova, Dr. Sci. (Econ.), Prof.,
E-mail: goroshkova69@gmail.com,
National university of "Kyiv-Mohyla academy", 2 Skovorody Str., Kyiv, 04070, Ukraine;
O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: menshov.o@ukr.net,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

EXTRACTION AND UTILIZATION FORECASTS FOR THE CONSTRUCTION NON-METALLIC MINERALS IN POST-WAR RECOVERY OF UKRAINE

The article provides modelling aimed at the management system design for the rational extraction and use of mineral resources of Ukraine applying the case of construction non-metallic minerals to ensure the country's post-war recovery. The projection volumes for production and rational use formed taking into account the needs of technologically related industries have been suggested. The official statistical data analysis on the production volumes of construction stone, construction sand and expanded clay raw materials during the studied period (15 years) have been carried out. It has been found out that indicators' fluctuations both in production volumes and their growth rates have a periodic, cyclical nature. They are correlated and related to the general economic condition of the construction industry and the country. It has been proven that solving the problem of minerals rational use is possible through their balanced extraction, namely putting correlation between extraction and utilization volumes. The authors' economic-mathematical model of forecasting the development of complex systems has been used to forecast industry's development. It has been proven that the model will allow managing the production of technologically related minerals depending on their utilization volumes.

It has been proven that amid war conditions due to the destruction of the country's infrastructure, there is a need to make model adjustments for balanced extraction and use of construction non-metallic minerals, taking into account generated construction waste and the needs of the post-war country's and its infrastructure's recovery. Modelling was carried out taking into account the new conditions of the industry's and the country's development. A five-year forecast has been made for the production and utilization of construction sand, construction stone and expanded clay.

Keywords: mineral and raw materials base, nonmetallic minerals for construction, building stone, sand, expanded clay, forecasting, modeling, management.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 556.332:62:556.324

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.13>О. Шевченко¹, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: shevch62@gmail.com;

В. Бублясь², канд. геол.-мінералог. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: bublias@ukr.net;

Д. Ошурок¹, канд. геогр. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: oshurok.dm@gmail.com;

¹Український гідрометеорологічний інститут НАН України та ДСНС України,
просп. Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна;²Інститут геологічних наук НАН України, вул. О. Гончара, 55^б, м. Київ, Україна**АНАЛІЗ ГЕОФІЗИЧНИХ, МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ДАНИХ
ДЛЯ ПОЯСНЕННЯ НЕВІДПОВІДНОСТЕЙ
МІЖ ІНФІЛЬТРАЦІЄЮ ТА АТМОСФЕРНИМИ ОПАДАМИ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)*

Розглянуто традиційний та нестандартний підходи до аналізу розрахункових значень інфільтраційного живлення ґрунтових вод із використанням показника заряду електричного поля приземної атмосфери. Зіставлення результатів гідрогеологічних розрахунків та спостережень за специфічними електрофізичними і метеорологічними чинниками дозволило пояснити невідповідності між значеннями інфільтраційного живлення та кількості опадів.

Визначено щодобові значення живлення ґрунтових вод за даними 41-річних спостережень по свердловинах в м. Хмельник. Середнє багаторічне значення інфільтраційного живлення ґрунтових вод з РГВ 0,8–2,3 м становило 145 мм, з РГВ 2,7–4,5 м – 14,7 мм (коливання в діапазоні від 129 мм до від'ємних значень). Крім початкового періоду впливу змін клімату на режим ґрунтових вод (1980–1988 рр.), кореляція між річними значеннями інфільтрації та опадів невисока. Значуща кореляція існувала лише до 1997 року для опадів літнього та осіннього сезонів. На цьому ж етапі (1980–1997 рр.) також зафіксовано тісний зв'язок між температурою та інфільтрацією зимового періоду. Проте існують також і значні суперечності у співвідношеннях інфільтрації та опадів, які вдалось пояснити лише із залученням даних власних електрофізичних спостережень. У період з 2008 по 2017 р. від'ємні значення коефіцієнтів кореляції "інфільтрація-температура" за літній сезон змінились на позитивні, що наводило на думку про зростання вагомості механізмів перенесення вологи у вигляді пари. Підкріплюють цей висновок дані про знак заряду статичного електричного поля приземного шару атмосфери. За високих значень напруженості статичного електричного поля (E) із від'ємним знаком, напрямку руху вологи має висхідний характер, завдяки чому випаровування із зони аерації збільшується у декілька разів порівняно з тим, що буває за нейтральних значень E. А напруженість електричного поля із додатним знаком формує низхідний рух вологи, який призводить до підвищення РГВ. Звідси, більш зрозумілими стають випадки, коли за значної кількості опадів отримано низькі значення інфільтраційного живлення (2006, 2008 р.). І навпаки, низька кількість опадів за 2014–2017 рр. (середнє значення 524 мм) супроводжувалась підвищенням живленням ґрунтових вод (10 % вище від норми), стабільним підземним стоком до річки в межах 90–100 м³/рік/м та зростанням РГВ завдяки додатним значенням статичного електричного поля. Цей електричний чинник має настільки потужний вплив, що здатний нейтралізувати та ефективно протидіяти негативному впливу на живлення ґрунтових вод зростання температури і дефіциту вологості повітря. Крім того, зростання випаровування стримувалось постійним зменшенням швидкості вітру.

Оскільки електродинамічні процеси мають значну, а подекуди й визначальну роль не лише у вологоперенесенні в зоні аерації, а й у регіональних процесах живлення ґрунтових вод, створення штучних позитивно заряджених статичних полів над поверхнею ґрунту може стати найбільш ефективним запобіжником виснаження запасів ґрунтових вод під час гідрогеологічної посухи.

Ключові слова: інфільтрація, рівні ґрунтових вод, заряд статичного електричного поля, температура повітря, опади, дефіцит вологості повітря, баланс, зона аерації, електродинаміка.

Вступ. У сучасних реаліях непередбачуваності погодних явищ та посилення несприятливих довготривалих кліматичних змін актуальним є пошук ефективних моделей прогнозування гідрогеологічних посух, а також репрезентативних гідрогеологічних показників і відносно незалежних гідрометеорологічних, гідрофізичних та геофізичних параметрів для цих моделей. Якщо ключовим показником впливу змін клімату на річковий стік є витрати відкритих потоків (Carvalho, Wang, 2019; Modarres, 2007; Tabari et al., 2013), то гідрогеологічна посуха добре проявляється за аномальними зниженнями рівня ґрунтових вод (РГВ) і розрахунковими значеннями їх балансу. РГВ є універсальним інтегральним параметром, з використанням якого виконуються всі чисельні розрахунки змінних показників водообміну, в т. ч. інфільтраційного живлення – прибуткової складової балансу, тісно пов'язаної із кліматом і мінливими погодними умовами.

Ґрунтові води вочевидь є одним із багатьох взаємодіючих природних компонентів складної динамічної системи, що зазнають новітніх змін, які, скоріш за все, в історії режимних спостережень ще не відбувались. Аномальні зниження РГВ, які спостерігались в Україні в

2011–2020 рр. майже повсюдно (Стан..., 2020; Шевченко та ін., 2021), і до сьогодні подекуди не набули помітного зворотного характеру, свідчать про зменшення емісних запасів перших від поверхні водоносних горизонтів, що є ознакою від'ємного водного балансу (Шевченко, Осадчий, 2020). Сучасні зміни в режимі рівня та стоку ґрунтових вод передусім пов'язані із змінами температури, кількості та характеру випадіння атмосферних опадів, режиму стоку річок (Шевченко і др., 2019; Шевченко та ін., 2021а). Проте коефіцієнти детермінації отриманих рівнянь регресії невисокі ($\leq 0,54$), а якість прогнозування лише на основі змін кількості опадів та середньої температури не достатня, що наводить на думку про існування більшої кількості, а можливо й більш впливових, чинників, ніж використовується зазвичай.

Вже достатньо давно доведено, що перенесення вологи у ненасиченій зоні відбувається, крім гравітаційних сил і градієнта вологості, під дією градієнта температури та градієнта електричного потенціалу (Kuzmak, Sereda, 1957; Тэйлор, Кері, 1966 та ін.). Досить істотним також є вплив на евапотранспірацію та живлення ґрунтових вод видового складу та віку рослинного покриву (Brechtel,

© Шевченко О., Бублясь В., Ошурок Д., 2023

1976; Гриневский, 2012). Більшість із цих чинників неусталені та слабо передбачувані, а їх накладена дія може зумовлювати й певні аномалії в характері живлення ґрунтових вод, які не дозволяють розглядати вологоперенесення як строго детермінований процес, зумовлений лише всмоктуючим тиском або ступенем насичення ґрунту вологою. Врахування таких різномірних механізмів та чинників переміщення води, як то глобальні зміни температури, регіональні зміни кількості опадів, швидкості вітру, локальні і точкові зміни напруженості електричного поля, проникності зони аерації (ЗА) та ін., значно ускладнює моделювання та прогнозування процесу водообміну, проте дає загальне розуміння об'єктивних причин перенесення води та коливань РГВ.

Сучасні методи прогнозування кліматичних змін здебільшого ґрунтуються на процедурі застосування ймовірнісних моделей, в які послідовно закладаються можливі комбінації метеорологічних параметрів. Це дозволяє отримати ряд сценаріїв, один з яких виявиться найбільш наближеним до реального. Для отримання прогнозу змін клімату використовують підхід "псевдоглобального потепління", який передбачає створення сигналу збуреної зміни клімату (Chen et al., 2020), що провокує відповідні відгуки метеорологічних та гідрологічних показників. Цей сигнал включає температуру поверхні землі, висоту геопотенціалу, вологість, горизонтальний вітер, температуру поверхні моря, тиск на рівні моря та температуру ґрунту (Liu et al., 2017; Rasmussen et al., 2017). Очевидно, що прогнозуючи живлення ґрунтових вод та РГВ, які залежать від змін клімату, слід враховувати регіональні кліматичні та локальні гідрофізичні показники в ЗА. Однак і цього недостатньо, коли постає завдання завчасного виявлення небезпечних процесів, на кшталт гідрологічної посухи, що ведуть до регіональних змін водних ресурсів.

Проблемні питання. За існуючими методичними схемами оцінка живлення ґрунтових вод проводиться за розрахунками інфільтрації атмосферних опадів, бокового притоку та відтоку, а також, у разі потреби, притоку та відтоку із напірного горизонту, що лежить нижче – під слабопроникною підшоєю. Проте виділити окремі елементи живлення та розвантаження, або визначити усі прибутково-витратні складові і виконати балансову оцінку живлення/розвантаження підземних вод доволі складно. В Україні складнощі з оцінкою вертикального перетікання здебільшого пов'язані з відсутністю кушових свердловин, а розвантаження ґрунтових вод до річки – з відсутністю гідрогеологічних створів, що замикаються на гідрометричних постах у зоні розвантаження ґрунтових вод. А тому часто користуються спрощеною схемою, за якою інтегральну величину живлення (або розвантаження) ґрунтових вод отримують за результатами вивчення характеру коливання РГВ, хоча для виконання прогнозової оцінки одних даних характеру зміни РГВ недостатньо. Без додаткової зв'язки або коригування іншими методами оцінка інфільтрації у моделях водного балансу може призвести до помилки на цілий порядок (Gee, Hillel, 1988). Метод прив'язки оціночного поповнення ґрунтових вод до фіксованої частки річних опадів також є далеко не точним, оскільки він не відображає сезонних коливань, ролі біоти та факторів, що контролюють рух води у верхніх шарах ЗА. Як показує практика, навіть детальний моніторинг опадів, транспіраційної води і врахування гідрофізичних властивостей порід не приносить бажаних результатів. Більш якісна оцінка кількісних показників живлення ґрунтових вод потребує нових підходів і залучення чинників, які нині стоять поза увагою гідрогеології та гідрофізики.

Навіть за наявності на сьогодні великої кількості теоретичних розробок, методологічних підходів та результатів польових і лабораторних досліджень (Bear, 1979; Healy, Cook, 2002; Ситников и др., 2003; Maxwell, 2010; Гриневский, 2012; Carrera-Hernández et al., 2012) складно переконливо пояснити низку явищ, пов'язаних із рухом води в ЗА і виконати достовірний прогноз природних ресурсів ґрунтових вод.

Для поліпшення достовірності гідрогеологічних та гідрологічних оцінок і прогнозів доцільно враховувати одночасно виміряні метеорологічні, гідрологічні, гідрофізичні та гідрогеологічні показники. Отже, щоб передбачити гідрогеологічну посуху або підтоплення необхідно поєднувати дані спостережень на комплексних метеогідрогеофізичних балансових майданчиках з регіональними характеристиками змін клімату та поверхневого стоку, визначеними за даними кількох метеостанцій і постів, а також з даними про глобальні циркуляційні процеси в атмосфері та прилеглих до материка океанах.

Метою даної роботи є виявлення та пояснення нових чинників, що мають істотний вплив на рух води в ЗА, встановлення природи (генетичних ознак) добоових, сезонних і багаторічних змін РГВ та інфільтраційного живлення ґрунтових вод на підставі порівняльного аналізу їх із коливаннями не лише загально прийнятих показників (температури, кількості атмосферних опадів, властивостей ґрунтів тощо), а й варіабельності таких чинників, як статичні електричні поля приземної атмосфери, що мають здатність переміщувати порові розчини (залежно від знаку зарядів) у висхідному і низхідному напрямках, а також пружних хвиль (автоколивань покривних відкладів), що виконують роль сепаратора рідкої і твердої фаз порід.

Об'єкти досліджень. Головним критерієм вибору об'єктів для підтвердження даної концепції та впровадження нетрадиційних підходів інтерпретації результатів режимних спостережень і гідродинамічних розрахунків були вимоги до специфічних геологічних умов – наявність на невеликій площі ділянок із добре сформованою мікроструктурою, де проявляються різкі зміни мікрогеодинамічних процесів. Наступною вимогою були необхідні технічні можливості отримання даних тривалих безперервних спостережень за режимом ґрунтових та поверхневих вод, а також комплексу геофізичних показників атмосфери і літосфери. За цими критеріями були підібрані два полігони розміщені у різних геологічних умовах. Перший полігон розташований у верхів'ях басейну р. Південний Буг, що лежить у північно-західній частині країни та належить лісостеповій зоні із достатнім рівнем зволоження. Він забезпечений гідрогеологічними свердловинами державної моніторингової мережі, гідрологічним постом та метеостанцією в м. Хмільник Вінницької області. А широкий спектр даних щодо закономірностей руху води в ЗА і живлення підземних вод отримано завдяки регулярним спостереженням і експериментальним роботам на полігоні "Лютіж", розташованому на вододілі між річкою Ірпінь і Київським морем у зоні південного Полісся. Специфіка дослідницьких робіт на цьому полігоні полягає у вивченні ролі мікрогеодинамічних і електродинамічних процесів у вологоперенесенні та фільтрації.

Методичні аспекти дослідження. По кількох балансових ділянках у верхній частині водозбору річки Південний Буг з різними РГВ та умовами їх живлення і розвантаження розраховано величини живлення ґрунтових вод для багаторічного періоду, який представляє кліматичний етап підвищення середньорічних температур і деякого зменшення суми атмосферних опадів (1980–

2020 рр.). Нові чинники, які мають істотний вплив на живлення ґрунтових вод, вивчалися на полігоні "Лютіж". В останньому випадку моніторингові дослідження були виконані за двома напрямками: 1) оцінка проявів і факторів мікрогеодинамічних процесів за допомогою синхронного контролю основних неусталених показників у межах мікрогеодинамічної зони (МГЗ) і фонові ділянки; 2) вивчення особливостей вертикального і горизонтального переміщення рідкої, твердої і газоподібної складових МГЗ. Проаналізовано розподіл живлення по сезонах року та по етапах, що виділяються за характером змін метеорологічних, геофізичних і гідрофізичних показників.

Поведінка води в породах зони аерації підпорядковується дуже складним природним і техногенним процесам ймовірного характеру, і може бути описана в термінах різних методичних підходів: 1) водно-балансового – за зміною запасів вологи, що отримують з різниці прибуткових і витратних складових, для чого існують сучасні балансові моделі (*Dubois et al., 2021*); 2) гідродинамічного – за коливаннями напору (РГВ) та розв'язанням скінчено-різницевого рівняння (що відносить цей метод також до балансових) (*Вольфцун, 1972; Киселев, 1967*) або за швидкістю і в'язкістю водних потоків (*Жернов, 1982; Лукнер та Шестаков, 1986; Bush et al., 1993*); 3) термодинамічного – за коливаннями тисків порової вологи в породах ЗА (*Bear, 1979; Ситников, 2010; Шевченко та ін., 2016*). Можливе також поєднання (комплексування) двох або більше підходів. Ми ж пропонуємо об'єднати для визначення та аналізу (у т.ч. верифікації) інфільтраційного живлення гідродинамічний метод аналізу даних спостережень за коливаннями РГВ та статистичний метод, який описує фактичну (емпіричну) залежність величини поповнення ґрунтових вод від метеорологічних та геофізичних чинників.

Для оцінки інфільтраційного живлення ми скористались відомим гідродинамічним методом розрахунків за різницею крайніх значень (*Киселев, 1967; Шевченко та Наседкин, 2001; Qurtas, 2018*). Основним є балансове рівняння, яке включає складову, що описує різницю між бічним відтоком і припливом до балансової ділянки за одиницю часу. Величина поповнення ґрунтових вод за рахунок інфільтрації (w) або витрата на випаровування (e) з РГВ (якщо значення від'ємне) визначалась за рівнянням

$$\Delta w = A \pm \Delta Q, \quad (1)$$

де A – зміна запасів ґрунтових вод (мм), яка визначається з рівняння

$$A = \Delta H \cdot \mu \cdot 10^3; \quad (2)$$

ΔQ – різниця між бічним припливом і відтоком на верхній і нижній за потоком границях балансової ділянки за час Δt для двох пунктів спостережень, мм. Оскільки коливання води у річці пов'язані із коливаннями РГВ на заплавах, то для свердловини № 5–3, яка розташована на відстані 86 м від р. Південний Буг у м. Хмільник, було прийнято виділити балансову ділянку в межах половини відстані від річки до свердловини і в гору – до половини відстані до вододілу, виділеного за абсолютними відмітками поверхні землі.

Різницю між бічним припливом та відтоком з балансової ділянки було визначено за чисельним гідродинамічним рівнянням неусталеної фільтрації (*Шевченко та Наседкин, 2001*):

$$\Delta Q = 2k_{\phi} \frac{h \cdot \Delta t (H_1 - H_2)}{l^2 + 2lL} \cdot 10^3, \quad (3)$$

де k_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації безнапірного водоносного горизонту, м/добу; h – середня для балансового

майданчика потужність водоносного горизонту, м; H_1, H_2 – середні за Δt рівні ґрунтових вод у пунктах спостережень, м; l – відстань між пунктами спостережень, м; L – відстань від верхньої за потоком свердловини до лінії підземного вододілу, м; 10^3 – коефіцієнт переходу в мм шару води.

Слід також наголосити, що процес живлення ґрунтових вод і їх відтоку до річки, судячи з коливань РГВ та рівня води в річці, для прирічкових, приозерних та нижніх частин транзитних ділянок є різко неусталеним і тому застосування аналітичних рівнянь усталеної фільтрації для визначення витрат потоку та розрахунків балансу є некоректним, а їх результати – помилковими. На вододілах, де амплітуда річних коливань РГВ менша за 1,0 м, для орієнтовних оцінок допускається застосування спрощених рівнянь усталеної фільтрації (на основі рівнянь Дарсі), хоча режим вологи в зоні аерації завжди залишається неусталеним.

Проте, як побачимо далі, скінчено-різницево рівняння, що використовують дані фактичних вимірювань РГВ, мають істотні недоліки: по-перше, за відсутності кущових свердловин не дають можливості виділити складову напірного живлення/розвантаження, по-друге – не дають змоги розділити інфільтраційне та конденсаційне живлення ґрунтових вод.

Для пояснення коливань інфільтраційного живлення в часі та виявлення чинників цих коливань були розроблені спеціальні прилади вимірювання коливань напружено-деформаційного стану порід і статичних електричних полів приземної атмосфери в автоматичному режимі, а також проведені експериментальні дослідні роботи зі встановлення закономірностей руху порових розчинів у породах зони аерації за допомогою гідрогеофізичної 8-канальної станції на методичному полігоні "Лютіж". Загальну оцінку руху вологи виконано за морфологічними особливостями графіків зміни РГВ. За цими показниками встановлено періоди і величину активного живлення водоносного горизонту та його розвантаження, а також розраховано об'єми води, що надходили до водоносного горизонту за певний період.

Результати досліджень. Під час багаторічних режимних спостережень за коливаннями РГВ і вологістю порід помічено, що волога з різною інтенсивністю постійно рухається як у низхідному, так і у висхідному напрямках протягом усього року, часто порушуючи традиційні причинно-наслідкові зв'язки між кількістю вологи, що надійшла на поверхню ґрунту, та реакцією на неї РГВ (*Бублясь, 2006; Шевченко та ін., 2016*). Найінтенсивніші коливання РГВ спостерігаються в осінню і весняну пори року – в періоди низьких і помірних опадів, проте високої нестабільності атмосфери, статичних електричних і баричних полів, а також значних коливань величин напружено-деформаційного стану порід.

Використовуючи дані багаторічних спостережень за РГВ, гідрометеорологічними показниками і геофізичними явищами, що впливають на рух вологи в породах зони аерації, спробуємо встановити між ними певні генетичні зв'язки або залежності. Для цього проведемо порівняльний аналіз даних гідрогеологічних, гідрофізичних і геофізичних спостережень та балансових розрахунків по двох полігонах: перший – у верхній частині басейну р. Південний Буг, другий – на правобережжі Київського водосховища.

За основу порівняльного аналізу взято дані безперервних спостережень за РГВ за відносно великий часовий проміжок (1980–2020 рр.), який охоплює період до початку активної фази потепління (1989 р.), активну фазу підвищення температури та період гідрологічної (2011–2020 рр.) і гідрогеологічної (2015–2020 рр.) посухи, що

являє надзвичайно важливу інформацію для порівняльних оцінок підземного стоку та балансу ґрунтових вод на час змін клімату та гідрогеологічного режиму. Для кращого порівняння та відстеження закономірностей у динаміці змін показників режиму та балансу ґрунтових вод ми виділили окремі, рівноцінні за часом етапи: 1980–1988, 1989–1997, 1998–2007, 2008–2017 та останні три роки (2018–2020). Ці етапи здебільшого маркуються помітними метеорологічними подіями, що вплинули на режим ґрунтових вод (Шевченко та ін., 2021а). За отриманими щодобовими значеннями інфільтраційного живлення коливання його річної суми на ділянці з діапазоном багаторічних значень РГВ у межах 0,8–2,3 м виявились досить значними: від 39,8 мм за 2020 р. до 347,5 мм за 1987 р. Стандартне відхилення річних значень за 41 рік склало 70,79; медіана 139,3; екстремум 0,767. Інший діапазон значень обсягів живлення отримано для балансової ділянки з коливаннями РГВ у межах 2,7–4,5 м: від -85,3 (1982 р.) до 129,0 мм (2013 р.). Отже інфільтрація, як у короткі терміни, так і у багаторічному плані, має достатньо неусталений характер і представляти її у вигляді

ізоляції по одиничних визначеннях або навіть усередненнях за 3–4 роки непоказово і некоректно.

Оскільки, згідно з традиційними уявленнями інфільтраційне живлення апіорі на пряму залежить від кількості опадів, було виконано спочатку парний, а потім і множинний кореляційний аналізи із залученням цього чинника та РГВ як предиктора.

Коефіцієнти парної кореляції (r) між коефіцієнтами інфільтрації та РГВ в абсолютних відмітках достатньо очікувано є не надто високими, хоча і поступово зростають з часом по виділених етапах від 0,58 (1980–1988 рр.) до 0,82 (2008–2020 рр.). Більш доцільно та коректно шукати зв'язок між *потужністю зони аерації* та інфільтраційним живленням. За отриманими r він достатньо значущий: від -0,73 на першому етапі до -0,86 для проміжку 2008–2020 рр.

Вплив річної кількості та сезонного розподілу опадів на інфільтрацію також не викликає сумніву. Як бачимо з рис. 1,а, опади відігравали головну роль у живленні ґрунтових вод на обох ділянках з різними РГВ на час перших двох етапів.

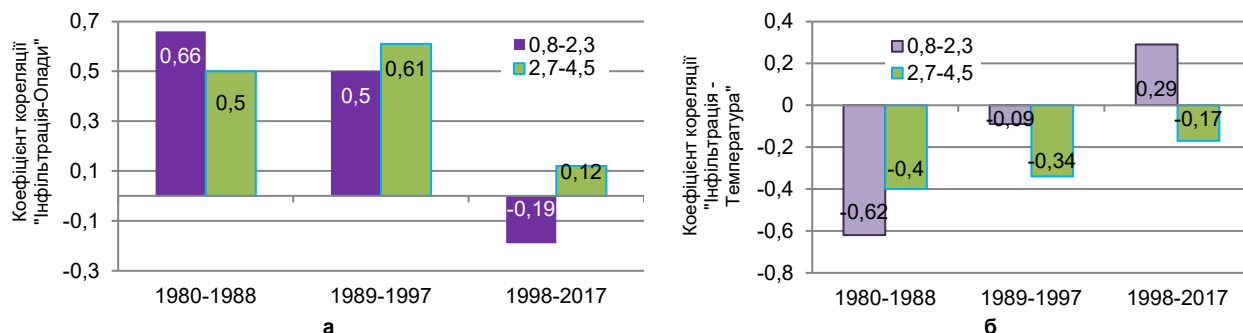


Рис. 1. Поетапні зміни коефіцієнтів парної кореляції між інфільтраційним живленням ґрунтових вод за рік (мм) на ділянках з РГВ, які за багаторіччя коливаються в межах 0,8–2,3 м та 2,7–4,5 м, та: а – сумою атмосферних опадів (мм); б – середньорічною температурою повітря, °С

У 1998–2017 рр., очевидно внаслідок переважання витратних складових балансу над прибутковими (зміна запасу становила 76,9 мм), що пов'язано із характером випаровування, особливостями руху вологи в зоні аерації (ЗА) і відтоку ґрунтових вод, значущий синхронний зв'язок—1999 рр. знизився до 7,0–11,6. Середній коефіцієнт інфільтраційного живлення на ділянці з РГВ 0,8–2,3 м у період 1980–1988 рр. сягав 35 %, у 1989–1997 рр. – 24,4 %, а у 2018–2020 рр. – 14 %, тобто зменшився у 2,5 раза порівняно з початковим періодом змін клімату на даній території. За абсолютними значеннями інфільтрації зміни ще більш різкі, відповідно: 237; 157 і 73 мм. Дані показники однозначно свідчать про певний зв'язок інфільтраційного живлення із зміною кліматичних умов – кількості атмосферних опадів, вологості і температури повітря, сили вітру тощо.

По коефіцієнтах кореляції добре видно (рис. 1), що до початку найбільш помітних кліматичних змін в Україні та Лісостеповій зоні зокрема (1989 р.) інфільтраційне живлення більше залежало від опадів як для глибин 0,8–2,3 м, так і для 2,7–4,5 м. Відтоді ж як середня температура лютого перший раз перейшла до позитивних значень (1989 р.) і піднялись літні температури, режим живлення до глибини 2,5 м порушився і рівень зв'язку інфільтраційного живлення з кількістю опадів зменшився до 0,5 (рис. 1,а); а коли середня температура піднялась до значень 8,1 °С (1998–2007 рр.), тобто на 1,3 °С порівняно з етапом 1980–1988 рр., відчутно зменшилось інфільтраційне живлення ґрунтових вод на глибинах 0,8–2,3 м (рис. 2), вірогідно внаслідок зростання витрат на

випаровування. Зворотні кореляційні залежності *температури* повітря і *живлення* ґрунтових вод (рис. 1,б) показують, що із збільшенням середньорічних температур живлення ґрунтових вод переважно зменшується (Osadchyi et al., 2021), особливо у літній період (рис. 3,б), що цілком зрозуміло. У той же час є очевидна логіка і у збільшенні інфільтраційного живлення при підвищенні температури у зимовий період внаслідок зменшення або відсутності промерзлого шару ґрунту. Відповідно, зменшення з роками значущості зворотної залежності (рис. 1,б) свідчить або про домінування з часом *ефекту зимових відлиг*, або ж про домінування раніше малозначущих механізмів вологоперенесення в зоні аерації влітку, коли випадає найбільше опадів.

На підтвердження першого свідчить помітне *зростання інфільтраційного живлення зимою* 2015–2017 рр. (рис. 3,а), яке контрастує із зменшенням кількості опадів. Талі води зимових відлиг почали відігравати значну роль у живленні вірогідно ще з 1981 р., проте спочатку лише для РГВ до 2,5 м: найтісніший зв'язок інфільтрації та температури *зимового сезону* проявився за період 1981–1988 рр., коефіцієнт кореляції (r) склав 0,71. На період 1989–1997 рр. для РГВ 0,8–2,3 м $r = 0,6$ (надалі був незначущим), а для РГВ 2,7–4,5 м $r = 0,66$. За період 1998–2017 рр. кореляційний зв'язок між інфільтрацією та зимовою температурою не встановлено для жодної з ділянок. У 2015–2017 рр. навіть для більш глибоких ґрунтових вод зменшення кількості опадів виявилось менш впливовим чинником інфільтрації, ніж зростання середньої зимової температури (рис. 3,а).

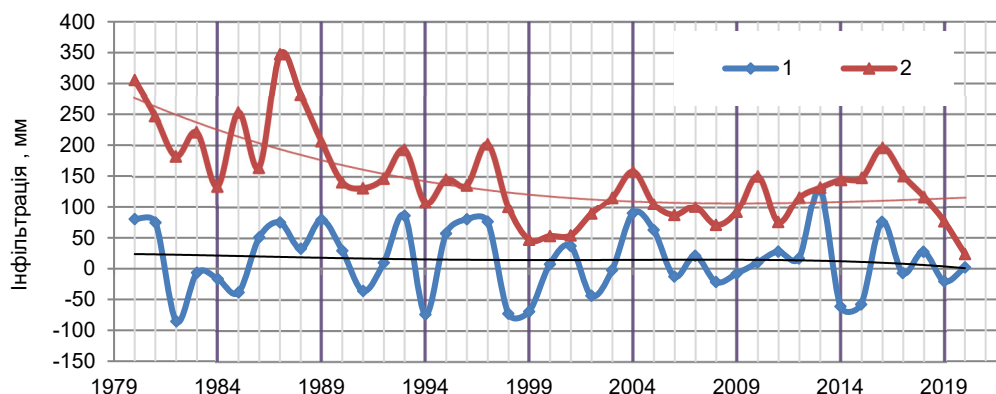


Рис. 2. Динаміка значень живлення ґрунтових вод на глибинах: 1 – 2,7–4,5 м; 2 – 0,8–2,3 м, розрахованих за даними моніторингових спостережень по свердловинах, відповідно, № 5-5 і 5-3 у м. Хмельник

Позитивний ефект впливу на живлення ґрунтових вод підвищеної літньої температури може бути пов'язаний із зростанням ролі *конденсаційної води*. Він тим більший, чим більший перепад денної та нічної температури (різке зростання спостерігається починаючи з 2001–2003 рр.). Конденсаційні процеси найбільше залежать від охолодження поверхні землі вночі. Для останніх десятиріч як раз характерне зростання надходження сонячної радіації у світлу пору та відповідно до закону Стефана–Больцмана – зростання віддачі тепла

вночі, що зумовлює збільшення випадків досягнення точки роси о цій порі. Підкріплюють це позитивні значення γ між інфільтраційним живленням та температурою на етапі 1998–2017 рр. (рис. 1,б).

Отже, позитивне значення γ між інфільтрацією та температурою повітря за 1998–2017 рр. для РГВ 0,8–2,3 м (рис. 1,б) та достатньо високі значення інфільтрації за зиму й літо (рис. 3) свідчать не лише про вирішальну роль зимових відлиг у живленні ґрунтових вод, а й про переміщення вологи на РГВ у вигляді пари.

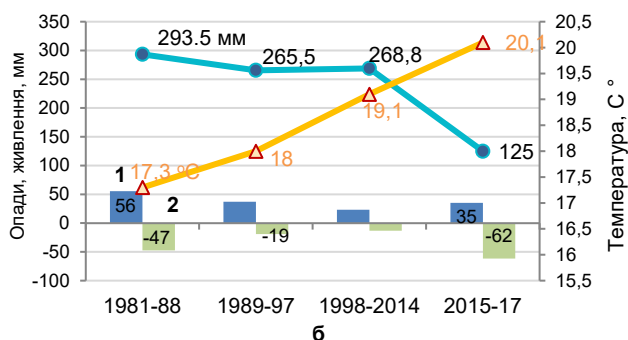
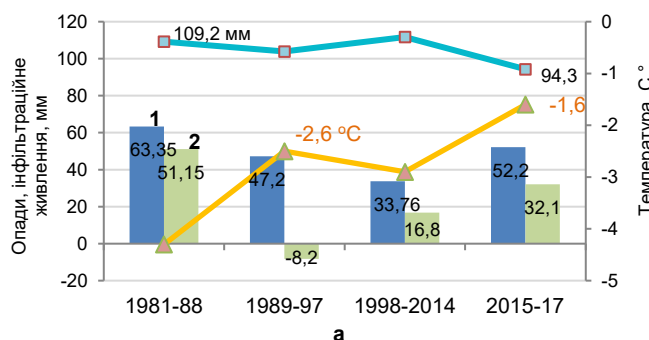


Рис. 3. Розподіл середніх значень інфільтраційного живлення ґрунтових вод по виділених етапах у зіставленні із середньосезонною температурою та середньою сумою атмосферних опадів: 1 – на балансовій ділянці з РГВ 0,8–2,3 м; 2 – на ділянці з РГВ 2,7–4,5 м; а – в зимовий період; б – влітку

До початку глобального потепління роль температури у випаровуванні із зони аерації не була значущою (Ткаченко, 1965). Дані моніторингу вологості порід за останні 15 років на полігоні "Лютіж" також не дають підстав вважати, що величина випаровування вологи із зони аерації є значною. Як відомо із закону Бойля–Маріотта та фактичних гідрометеорологічних даних, з поверхні слабо зволоженого ґрунту за збільшення температури на 1° випаровування зростає на 20–30 мм. Проте у випадку балансової ділянки з РГВ 0,8–2,3 м у м. Хмельник середні значення інфільтраційного живлення по етапах зменшилися з 237,6 мм (1980–1988) до 91,2 мм (1998–2007 рр.) при зростанні середньої температури лише на $1,3^{\circ}\text{C}$. Очевидно, що таке істотне зниження живлення не можна віднести лише на рахунок випаровування.

З викладеного аналізу можна зробити висновки: 1) використання методу парної кореляції без вивчення механізмів руху вологи є недостатнім; 2) прогностичні оцінки живлення ґрунтових вод, побудовані лише на традиційних уявленнях про чинники (опадів, градієнт вологості) та механізми переміщення рідкої вологи переважно під впливом гравітаційних сил можуть виявитись

помилковими. Очевидно, що низька якість оцінки інфільтраційного живлення за кількістю опадів може бути пов'язана не лише із змінами кліматичних умов упродовж холодного та теплого сезонів року, а й із іншими впливовими чинниками, які здебільшого не враховуються на рівні спостережень, розрахунків і прогнозування. На сьогодні є гостра потреба виявлення і вивчення генетичних основ гідрофізичної сутності цих чинників і залучення нових показників у практику.

Певні методичні і теоретичні напрацювання в цьому напрямку, виконані на полігоні "Лютіж", було застосовано для пояснення виявлених особливостей інфільтраційного живлення ґрунтових вод на балансових ділянках у м. Хмельник. На підставі статистичної обробки даних температури, підземного стоку, інфільтраційного живлення, коефіцієнта інфільтрації побудовано зведену таблицю (табл. 1). Аналізуючи наведені показники, можна виділити дев'ять періодів, які відрізняються за важко пояснюваною комбінацією залежних функцій (підземний стік, інфільтрація) та відносно незалежних чинників (опадів, температура), що мали б більш однозначно на них впливати (рис. 4).

Таблиця 1

Метеорологічні показники та розрахункові значення складових балансу ґрунтових вод на прирічковій ділянці з перетіканням напірних вод до ґрунтових (РГВ коливаються в межах 1,0–2,3 м)

Роки	Опади, мм	Підземний стік Q, м³/рік/м	Інфільтраційне живлення, мм	Коефіцієнт інфільтрації	Середньорічна температура, °С	РГВ, м абс. БС	Знак заряду статичного електричного поля
1980	803,0	128,38	305,7	38,07	5,7	246,46	Можливо додатний
1981	801,7	132,23	247,3	30,85	7,4	246,39	
1982	609,2	112,85	182,7	29,99	7,7	246,07	
1983	613,4	109,63	221,4	36,09	8,4	245,98	Вірогідно нейтральний
1984	623,0	89,56	134,6	21,60	7,0	245,72	
1985	700,4	98,60	253,0	36,12	5,7	245,85	
1986	542,6	86,01	164,7	30,35	7,0	245,62	
1987	694,8	132,63	347,5	50,01	5,4	246,29	Можливо додатний
1988	676,9	160,11	281,4	41,57	7,0	246,73	
1989	694,1	131,88	207,2	29,85	8,7	246,25	
1990	542,0	82,10	141,6	26,13	8,8	245,44	Вірогідно нейтральний
1991	729,6	80,87	131,9	18,08	7,3	245,50	
1992	505,9	74,27	147,4	29,13	7,9	245,48	
1993	691,9	91,46	193,6	27,97	7,0	245,60	
1994	487,0	73,25	107,8	22,13	8,4	245,45	
1995	675,5	71,08	145,5	21,55	7,7	245,40	Ймовірно від'ємний
1996	758,3	60,52	136,5	18,00	6,5	245,49	
1997	758,5	83,04	202,2	26,66	7,1	245,89	
1998	865,5	54,54	100,2	11,58	7,6	245,63	
1999	674,4	71,69	46,91	6,96	8,7	245,55	
2000	587,1	65,57	52,84	9,00	8,8	245,52	
2001	680,7	53,39	54,05	7,94	6,9	245,52	Додатний
2002	628,0	66,13	89,41	14,24	8,5	245,49	
2003	491,9	82,91	116,49	23,68	7,6	245,61	
2004	684,1	99,84	158,49	23,17	7,9	245,76	Від'ємний
2005	666,1	82,12	105,38	15,82	7,8	245,68	
2006	759,8	54,78	87,21	11,48	7,6	245,53	
2007	681,4	84,28	100,6	14,76	9,1	245,54	Нейтральний
2008	639,6	55,74	70,93	11,09	9,0	245,48	
2009	634,6	69,36	92,26	14,54	8,7	245,48	
2010	629,2	88,81	150,80	23,97	8,3	245,70	Додатний
2011	451,4	78,40	75,78	16,79	8,4	245,51	
2012	666,2	77,10	116,73	17,52	8,2	245,39	
2013	743,7	69,33	132,72	17,85	8,6	245,72	Додатний
2014	539,0	99,61	145,22	26,94	8,7	245,86	
2015	389,2	98,90	148,61	38,18	9,8	245,85	
2016	562,6	94,94	196,43	34,91	9,1	245,79	Додатний
2017	605,1	90,73	151,46	25,03	8,9	245,71	
2018	548,0	76,45	117,82	21,50	8,9	245,07	
2019	486,4	63,76	76,67	15,76	9,5	244,99	Додатний
2020	514,0	36,34	23,90	4,65	10,1	244,65	
Середні	635,0	85,7	145,44	23,0	7,99	245,70	

Суть аномальності окремих періодів (1998–2001, 2002–2005, 2006–2010 та ін.) полягає у невідповідності (диспропорції) між кількістю опадів, ґрунтового стоку, живлення ґрунтових вод та РГВ. У ряді випадків (1991, 1998, 2001, 2006, 2012, 2013 р.) при опадах, вищих за річну норму (635 мм), ґрунтовий стік, живлення та РГВ були непропорційно і абсолютно менші, ніж за опадів, нижчих за норму (1990, 1992, 1994, 2003, 2014, 2015, 2016 р.). Якщо проаналізувати дані по десяти роках із верхньої і нижньої частин таблиці, які представляють відповідно відносно вологий і посушливий періоди, то також простежуються значні невідповідності. За зменшення опадів на 14 % живлення ґрунтових вод зменшилось майже на 50 %, а помітне зростання кількості опадів у 1997–2001 та 2006–2009 рр. супроводжувалось зменшенням живлення ґрунтових вод, і навпаки – зменшення кількості опадів у 2002–2005 та 2014–2017 рр. проявилось у деякому зростанні інфільтраційного живлення і т. п. Загалом з діаграми на рис. 4 видно, що після 1995 р. середнє за кожний виділений етап живлення коливалось у протифазі з опадами (крім

останнього етапу). Значущий позитивний кореляційний зв'язок між живленням та сумою річних опадів для РГВ 0,8–2,3 м після 1988 р. знижується і після 1997 р. майже втрачається, для РГВ 2,7–4,5 м до 1997 р. набуває більшої значущості, проте надалі зменшується. Отже, досить сумнівним виглядає твердження про те, що інфільтраційне живлення ґрунтових вод передусім підпорядковується та напряму залежить від динаміки опадів. Хоча, без сумніву, інфільтраційна волога має атмосферне походження.

К.Д. Ткаченко у праці "Баланс вологи в зоні азрації" показує чотири аспекти однієї проблеми достовірного розрахунку та прогнозування показників режиму ґрунтових вод: 1) природа невідповідності суми прибуткових і витратних складових живлення/розвантаження ґрунтових вод кількості атмосферних опадів; 2) адекватне відображення неоднозначного впливу на живлення ґрунтових вод змін кліматичних умов (в бік континентальності і загального потепління за останні 50 років); 3) врахування при розрахунках та прогнозуванні складових балансу ґрунтових вод метеорологічних чинників "другого плану":

швидкості вітру, насичення повітря водяною парою тощо;
4) можливість прогнозування обсягів стоку (ресурсів)

ґрунтових вод, спираючись на вірогідні прогнози значення кліматичних показників.

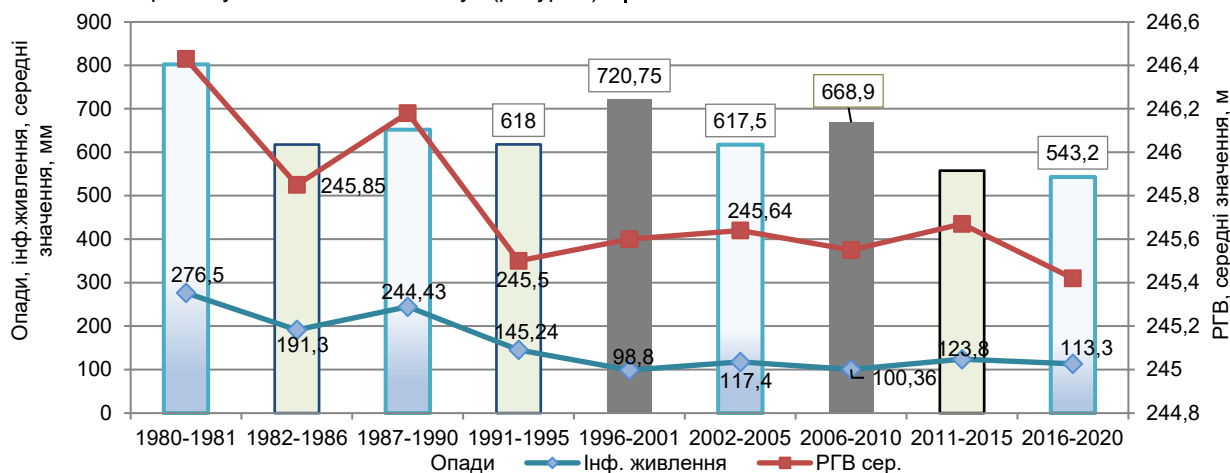


Рис. 4. Специфічні коливання середніх значень опадів, інфільтраційного живлення та РГВ за певні періоди, виділені за знаком заряду статичного електричного поля у приземному шарі атмосфери за аналогією з достеменно встановленими на полігоні "Лютіж" (див. табл. 1)

Серед чинників, які викликають коливання РГВ, є й такі, що безпосередньо не пов'язані із живленням або розвантаженням ґрунтових вод. До них належать гравітаційні сили Місяця і Сонця, баричні коливання атмосфери і слабкі вібромеханічні процеси. На графіках детальних (почасових) замірів РГВ часто відображаються підняття дзеркала ґрунтових вод у денний час і зниження у нічний. Є підстави вважати, що ми маємо справу із гравітаційною силою Сонця. Подібні ж коливання РГВ пов'язані із впливом Місяця, але вони зміщуються в часі залежно від його фази. За різких і значних змін атмосферного тиску РГВ також змінюються – інколи до 15–17 см.

В останні десятиліття проводились спеціальні дослідні роботи в натурних умовах із вивчення механізмів (крім традиційних) руху води в породах ЗА, завдяки яким встановлені нові важливі чинники здатні істотно впливати на розподіл води та показники режиму ґрунтових вод. Серед них найбільшої уваги заслуговують *мікрогеодинамічні і електродинамічні коливання* різного рівня циклічності: добові, місячні, сезонні, річні, багаторічні тощо. Кожен цикл має свої генетичні особливості і певну гідрогеологічну дію. Динаміка і механізм впливу цих сил на геосферу досить складні і мало досліджені. Ми виявили лише окремі ефекти їхньої дії. За даними дослідних робіт, роль механічних сил полягає у формуванні структури геологічного середовища (у т. ч. зон швидкої міграції) і сепарації окремих фаз порід (рідкої, газоподібної, дрібнодисперсної). Механічні коливання (пружні хвилі земної поверхні), які можна віднести до мікросейсмічних, виникають за зміни швидкості обертання Землі і гравітаційних сил Місяця і Сонця (припливно-відпливні процеси).

На сьогодні вже встановлені нові механізми, що впливають на рух порових розчинів у покривних відкладах, завдяки яким виявлені певні закономірні зв'язки між електродинамічними, геодинамічними і гідрогеодинамічними процесами. На підставі цих даних можна пояснити ряд аномальних і неоднозначних явищ, які виникають у наземній і підземній гідросфері за різних ландшафтних умов. Як приклад новими теоретичними розробками можна логічно пояснити, чому в певні періоди волога в ЗА може рухатися в бік більш вологих горизонтів всупереч термодинамічним силам, або чому породи зони аерації западинних форм з аномальними геодинамічними

властивостями, які за механічним складом важчі, ніж фонові і здатні утримувати значно більше води, зневоднюються швидше від фонових, чому розвантаження водоносного горизонту в аномальній зоні за об'ємом і швидкістю значно перевищує розвантаження з фонові ділянки; а також, чому після дощу РГВ знижуються? У цій самій площині лежать відповіді на питання нестабільного режиму хімічного складу підземних вод і багато іншого (Шевченко та ін., 2016).

До провідних чинників вологоперенесення слід зараховувати *напружено-деформаційний стан порід* (Бублясь, 2010). Сейсмічна діяльність Землі може відображатися в режимі підземних вод не лише у вигляді короткочасних сплесків, але і в довгостроковій докорінній зміні умов формування їх ресурсів. Так, за даними (Альтовский, Коноплянцева, 1954), багато джерел після землетрусу в Ашгабаді (1946 р.) збільшили свої дебіти у кілька разів, а рівні підземних вод в одних випадках знизилися, а в інших – піднялися. Подібне явище трапилось в Італії, коли протягом двох років після головного сейсмічного поштовху 2016 р. водоносні горизонти, що живлять річку Нера, розвантажувалися швидше (внаслідок зростання проникності водоносного горизонту та порового водяного тиску з наступними змінами гідравлічного градієнта), що спричинило різке збільшення стоку річки (Di Matteo et al., 2021).

Ефекти зміни рівнів, дебітів і хімічного складу ґрунтових вод інколи зберігалися до кількох років. Так, на полігоні "Лютіж" підвищена мінералізація ґрунтових вод у мікрогеодинамічній зоні, завдяки резонансу стоячої хвилі у 2013 р., спостерігалась упродовж майже двох наступних років. РГВ можуть помітно коливатись також за різких змін напружено-деформаційного стану порід. Так, у річному циклі чітко простежується два підвищення РГВ у періоди прискорення обертання Землі і два зниження – у періоди її уповільненого обертання (рис. 5). Виходячи з даних про вологість порід, така швидкість переміщення води під впливом лише меніскових сил практично неможлива.

Наступним важливим чинником у живленні ґрунтових вод є різного роду *електричні і електромагнітні явища*, які мають низку джерел генерації у геологічному середовищі і приземній атмосфері (Бублясь, 2017). У породах покривних відкладів у результаті затухання автоколивальних пружних хвиль виникають електричні і теплові

поля. Крім того, значні електричні потенціали формуються під час іонізації повітря в порах ґрунтового покриття і порід зони аерації за рахунок розпаду природних радіоактивних елементів (радію, радіоактивного калію, радону, торону, вуглецю та ін.), які в них містяться.

Іонізовані флюїди порід взаємодіють з електричними полями атмосфери. В атмосфері періодично, залежно від знаку полюсів магнітного поля Сонця, температури атмосферних фронтів, характеру зміни напружено-деформаційного стану порід (стиснення, розтягування) формуються переважальні додатні або від'ємні електричні статичні поля, які до поверхневих шарів літосфери притягують протилежні за знаком електричні заряди (іони, електрони), де відбувається так званий обмін

електричними зарядами між атмосферою і літосферою у вигляді електричного струму (Бублясь, 2017). Показники сили електричного струму відображають рух певних (заряджених) матеріальних часток – електронів, іонів, молекулярних заряджених асоціацій у певному фізичному стані (газоподібному, рідкому і високодисперсному твердому). Молекули води, як дипольні системи, за наявності шарів із домінуючими електричними зарядами переміщуються від ділянок (шарів) із позитивними зарядами (анодних) до негативних (катодних полів) як у рідкому, так і в газоподібному стані. Необхідно підкреслити, що волога в пароподібній формі рухається значно швидше, ніж у рідкому стані (Шевченко та ін., 2016).

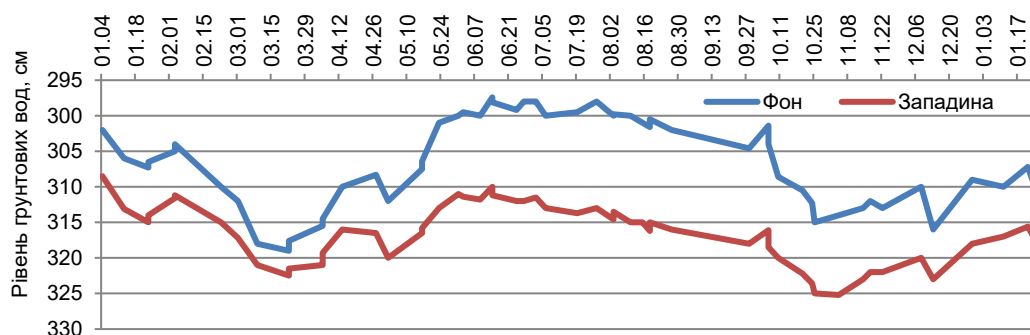


Рис. 5. Характер коливання рівнів ґрунтових вод у режимних свердловинах фоновій ділянці (Ф) і мікрогеодинамічної зони (З) на полігоні "Лютіж" за 2017 р. та січень 2018 р.

За даними експериментів, на рух вологи в ЗА великий вплив має *напруженість статичного електричного поля (Е) приземної атмосфери*. За високих значень E із від'ємним знаком напрямом руху вологи має висхідний характер, завдяки чому випаровування із ЗА збільшується у декілька разів щодо нульових значень E . А напруженість електричного поля приземної атмосфери з додатним знаком формує зворотний рух вологи, призводить до підвищеної інфільтрації порових розчинів. Підтверджується подібна схема також даними замірів вологості порід і вологості приземної атмосфери. Під час сплесків напруженості електромагнітного поля (із знаком мінус) вологість порід може знижуватися до 1–2 %, а вологість повітря над поверхнею ґрунту – збільшуватися до 15–20 % (Шевченко та ін., 2016).

Яскравим прикладом впливу статичного електричного поля на рух порових розчинів є дані режимних спостережень у весняний період 2020 р., коли проявився накладений вплив геодинамічних і активних електро-

динамічних процесів. У другій половині березня і більшій частині квітня швидкість руху Землі прискорювалася, що призвело до геодинамічних рухів (пружних хвиль) в основному у верхніх шарах літосфери. Оскільки затухання пружних хвиль призводить до виникнення п'єзоелектричних полів, то на цей час ми отримали, окрім високих значень змін напружено-деформаційного стану порід, досить високі показники від'ємного статичного електричного поля (рис. 6), яке вплинуло на зменшення вологості і зниження РГВ. Необхідно підкреслити, що в атмосфері в цей час переважав антициклонльний стан погоди ("стан хорошої погоди") і активні фронти, які могли б підвищити статистику, були відсутні. У більшості випадків у цей період спостерігається різкий підйом РГВ (рис. 7), проте 2020 р. був винятковим – РГВ до початку травня не піднімалися, оскільки від'ємні статичні поля активно переміщували вологу із порід ЗА в атмосферу.

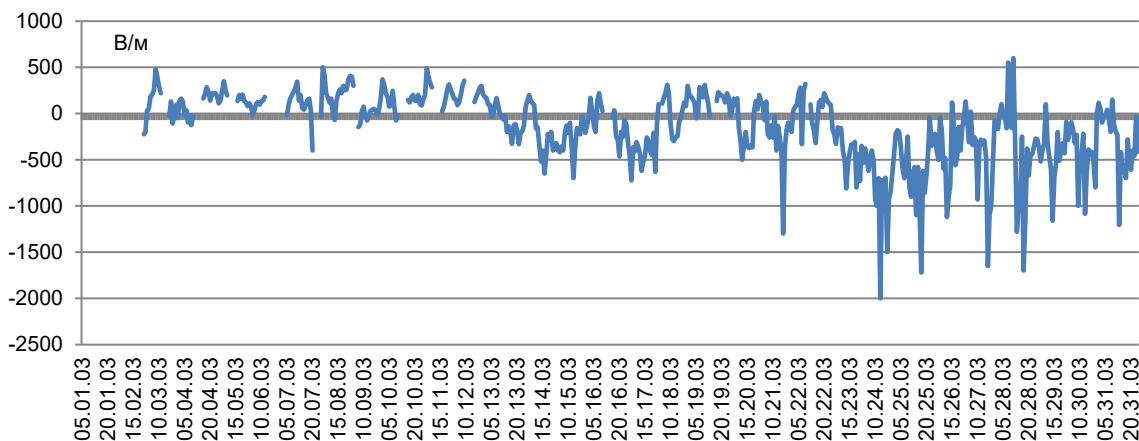


Рис. 6. Коливання напруженості статичного електричного поля приземної атмосфери (В/м) на полігоні "Лютіж" протягом березня 2020 р. під впливом прискорення обертання Землі

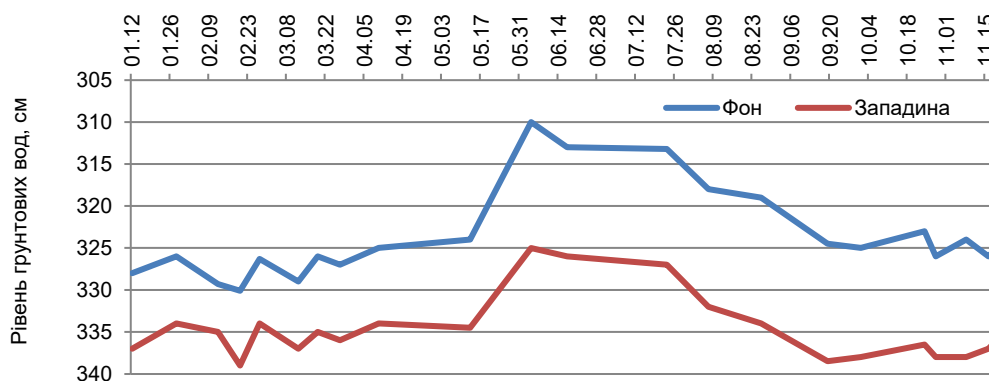


Рис. 7. Коливання рівнів ґрунтових вод в умовах "хорошої" (антициклональної) погоди і від'ємних статичних електричних полів у режимних свердловинах на полігоні "Лютіж" за 2020 р.

Досить потужний вплив на приземну електрику мають атмосферні фронти: отже холодні фронти приносять переважно від'ємні заряди, і в результаті їх дії РГВ знижуються, а теплі фронти приносять додатні заряди, які сприяють підвищенню РГВ (Бублясь В., Бублясь М., 2013). Зовсім інші особливості руху вологи в умовах рясних грозових дощів із крупними краплями, що несуть на денну поверхню переважно від'ємні заряди. У даному сценарії перенесення вологи простежуються два зустрічні напрямки їх руху – із ґрунтового покриву інфільтрується гравітаційними силами атмосферна волога, а із нижніх горизонтів і ґрунтових вод, за рахунок електродинамічного градієнта, відбувається висхідний рух флюїдів. Як наслідок можуть виникати аномальні явища із різкими стрибками зростання або зниження вологості порід залежно від напружено-деформаційного стану порід і електричних потенціалів.

В умовах структурованої геологічної системи міграція високорухомих складових підпорядковується цій системі і сконцентрована переважно по нестабільних, геодинамічно активних структурних елементах різного рівня – зонах швидкої міграції (ЗШМ), в яких швидкість і об'єм переміщеної вологи може перевищувати те ж саме на фонових ділянках у декілька разів (Бублясь, Шестопалов, 2001). Причина цих аномальних явищ криється у підвищених мікрогеодинамічних і електродинамічних процесах у межах цих специфічних геологічних об'єктів.

Особливу функцію у переміщенні вологи відіграють мікрогеодинамічні зони (МГЗ), оскільки вони є генераторами

вібромеханічних коливань, і певних електричних полів, які нерідко відрізняються від фонових за величиною і знаком, що створює ефекти біполярного поля в геологічному середовищі на окремих ділянках (Бублясь, 2006). А тому часто спостерігаються аномальні явища, коли у свердловині на фонівій ділянці РГВ піднімаються, а в МГЗ знижуються завдяки протилежно спрямованим потокам вологи.

Завдяки значній водозбірній площі западинних морфоскульптур через їх зони швидкої міграції проходить у 2–4 рази більше вологи, ніж через породи ЗА фонових ділянок (Бублясь, Шестопалов, 2001). Якщо значний об'єм вологи в МГЗ пояснюється впливом мікрорельєфу, то аномально високу швидкість переміщення вологи лише гравітаційними і капілярними силами пояснити не можна. У даному випадку маємо яскравий приклад роботи електричних сил. Процеси зволоження і зневоднення потужніші саме в ЗШМ, де градієнти електричних потенціалів вищі.

Достатньо чутливою до зміни електричних явищ є волога порід ЗА (рис. 8): зміни знаку заряду статичного електричного поля визначають напрямок руху вологи – висхідний або низхідний. Розглянемо період із відносно нейтральними статичними полями (2011–2015 рр.), коли у першій половині цього циклу електромагнітних хвиль із від'ємними зарядами було більше, ніж у другій половині, коли переважали додатні заряди. У результаті цієї взаємодії у 2011 і 2012 рр. запас вологи в ґрунті був значно менший, ніж у другій половині цього циклу 2013–2014 рр. (рис. 8). Хоча сума опадів у першій половині циклу була на 220 мм більша, ніж у другій половині(!).

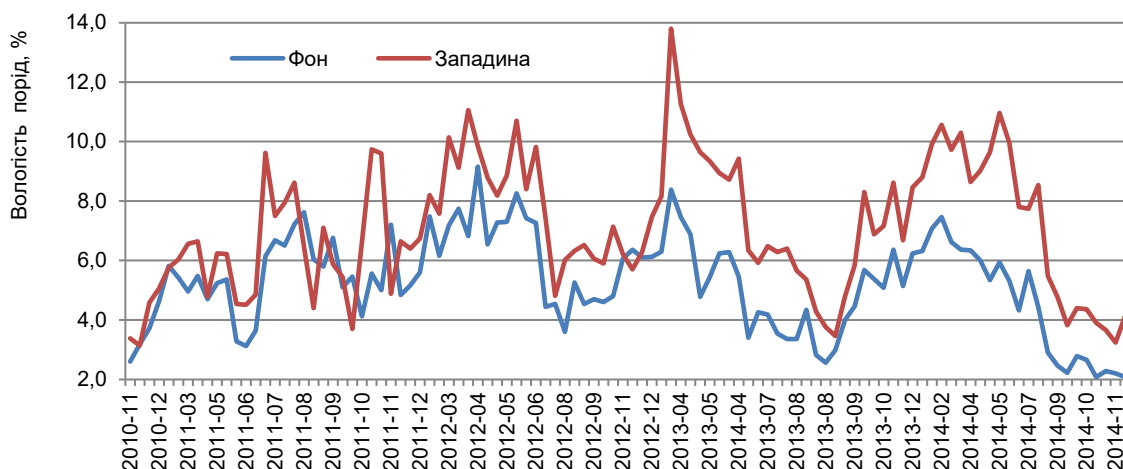


Рис. 8. Характер зміни вологості порід (середні значення) зони аерації, визначеної термостатно-ваговим методом, які відображають особливості їх зволоження і висихання в перехідний період від від'ємних статичних електричних полів до додатніх у межах фоновій ділянки (Ф) і МГЗ (З) на полігоні "Лютіж" за період 2010–2014 рр.

Тепер повернемося до пояснення аномальних явищ, представлених у таблиці 1. Виходячи з детальних досліджень чинників, що впливають на рух поверхневих і ґрунтових вод, більш аргументовано можна оцінювати гідрогеологічні явища за період з 2003 по 2020 р. завдяки детальним дослідним роботам на полігоні "Лютіж". За даними режимних спостережень, виділяються періоди із чіткими додатними – 2002–2005, 2016–2020 рр., від'ємними – 2006–2010 рр., нейтральними (немає виражених ознак додатних або від'ємних полів) – 2011–2015 рр. статичними електричними полями. У періоди з додатними статичними полями (2016–2020 рр.), за відносно невеликих опадів, величини живлення ґрунтових вод були вищі, ніж за період із від'ємними статичними полями (2006–2010 рр.), коли опади були вищі за норму. А як уже було зазначено, за від'ємних статичних полів приземної атмосфери волога в зоні аерації має переважно висхідний напрямок руху – до земної поверхні і швидко випаровується, тоді як при переважаючих додатних полях спостерігається низхідний напрямок руху вологи – до водоносного горизонту. Тому навіть за відносно незначних опадів (2015–2019 рр.) величини живлення ґрунтових вод виявились досить високими. На підставі

результатів даного аналізу можна екстраполювати встановлені закономірності і на верхню частину таблиці 1.

Якщо відібрати розрахункові значення інфільтраційного живлення лише за теплий період року (травень–жовтень) та розділити їх по періодах із достеменно встановленим знаком заряду статичного поля приземного шару атмосфери, то дуже добре видно (рис. 9), що, незважаючи на зменшення кількості опадів (P), зростання дефіциту вологості повітря (рис. 9, 10а), з яким інфільтрація має достатньо високу негативну кореляцію ($-0,6$ за 41 рік), середньомісячне інфільтраційне живлення зросло майже на 30 % за позитивних значень заряду статичного поля (порівняно із від'ємним). Якщо ж розглядати лише період з позитивним зарядом 2016–2020 рр., то при $P=59$ мм, ДВП=6,8 гПа, температура зросла до 16,8 °C, а інфільтрація до 8,9 мм. Крім того, виявилось, що за від'ємного заряду зустрічається майже 50 % випадків (вибірка за 30 місяців) із від'ємним живленням (найбільше у 2006 і 2008 рр. – по 4 місяці), тобто переважанням евапотранспірації та втрат на насичення зони аерації над інфільтрацією. За нейтрального заряду таких значень 33 % (10 із 30), а за позитивних зарядів – 22 % (якщо брати лише 2016–2020 рр., то 20 %).

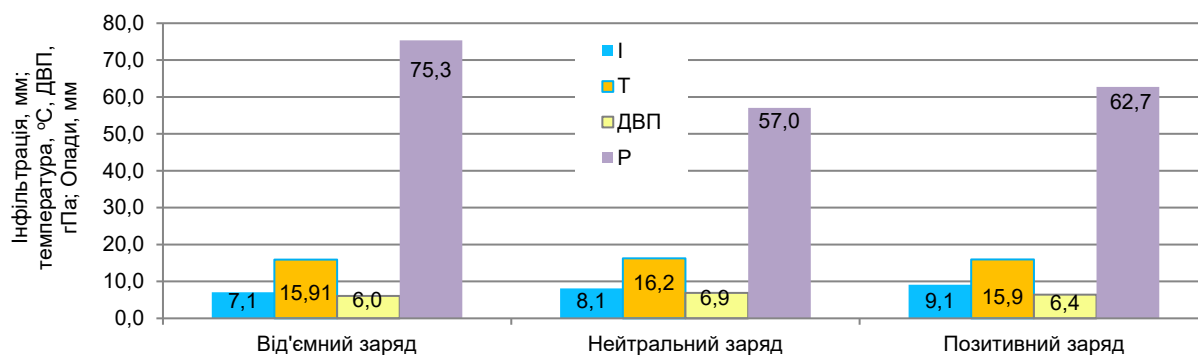


Рис. 9. Коливання інфільтраційного живлення теплого періоду року (травень–жовтень) на ділянці з РГВ 0,8–2,3 м у зіставленні із середньомісячними значеннями метеорологічних чинників: температурою (Т), дефіцитом вологості повітря (ДВП) та опадами (Р) за періоди з від'ємним (2006–2010 рр.), нейтральним (2011–2015 рр.) і позитивним (2002–2005, 2016–2020 рр.) зарядом статичного поля приземного шару атмосфери

Вітер є похідним явищем від переміщень повітряних мас в атмосфері, зумовлених наявністю баричних градієнтів. Ці переміщення за певних циркуляційних умов зумовлюють появу теплих або холодних атмосферних фронтів. Принаймні зрозуміло, що сила (або швидкість) вітру відіграє важливу роль у розподілі вологи на поверхні ґрунту. Аналізуючи сезонний розподіл інфільтраційного живлення на ділянках з різним діапазоном коливань РГВ, можна припустити, що на інфільтраційне живлення літнього періоду істотно вплинуло поєднання кількох чинників: РГВ, температури повітря, кількості та характеру розподілу опадів і *швидкості вітру*. Останнє коливається у протифазі із сезонним ходом температури повітря, тобто набуває мінімальних значень у літній період. На ділянках з РГВ 0,8–2,3 м після 1989 р. живлення під час літнього сезону було більшим за таке у весняний період. Можна припустити, що зменшенню інфільтраційного живлення за літній період 1989–2014 рр. на ділянках з високими РГВ протидіяло зниження сили вітру (рис. 10б) та сприятливий затяжний характер опадів. Так, швидкість вітру з 1980 по 2019 р. знизилась на 0,8 м/с, тобто на 0,2 м/с за кожні 10 років. Цей показник є досить високим, оскільки в середньому у світі сила вітру зменшувалась за цей час з інтенсивністю 0,14 м/с. Звісно, крім цього, слід аналізувати ступінь насичення повітря водяною парою,

оскільки високе насичення або низький парціальний тиск пари також стримує випаровування.

Таким чином показано, що зниження РГВ у 2015–2020 рр. пов'язане не лише із зменшенням кількості опадів та зростанням випаровування. По-перше, істотного зниження кількості опадів не відбувалось, хоча, звісно, аномально низька їх кількість у 2015 та 2019 рр. загострила рецесію РГВ. Проте, зважаючи на інертність або значну уповільненість процесів вологоперенесення та фільтрації, порівняно з рухом вільної води, слід враховувати чинники, які достатньо помітно проявили себе у попередні періоди. З аналізу показників режиму та розрахунків підземного стоку і балансу ґрунтових та поверхневих вод стає очевидним, що передумови зниження РГВ були закладені ще у 80–90-ті роки. Спочатку підвищення температури зимового сезону сприяло посиленню живлення ґрунтових вод, зростанню РГВ, проте – зменшенню повневіх витрат річок, а згодом, за сезонного перерозподілу опадів і деякого їх зменшення, – загальному зменшенню стоку річок. Отже, спочатку, з 2003–2004 рр., склались передумови *гідрологічної посухи*. Зменшення рівнів води в річках, а отже і зниження базису ерозії призвело до стрімкого *збільшення градієнтів дренажного стоку* і, як наслідок, спрацювання запасів ґрунтових вод. Ці тенденції посилювались

починаючи з 2010–2011 рр. завдяки зменшенню кількості зимових опадів, деякому зниженню зимових температур, а також завдяки зростанню літніх температур. І коли за від'ємного балансу, зумовленого підвищеним бічним відтоком, та різкого зниження кількості опадів у 2015 р., інфільтраційного поповнення ґрунтових вод виявилось недостатньо, гостро проявився ефект *гідрогеологічної*

посухи – а зонального зниження РГВ на значній території. Негативні наслідки могли б бути ще більш разючими, якби на період 2016–2020 рр. статичне електричне поле приземної атмосфери не мало позитивного заряду (див. табл. 1), який спрямовував низхідні потоки пароподібної вологи через порове середовище зони аерації.

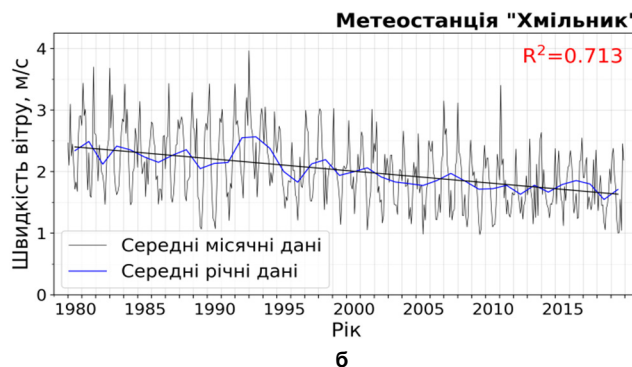
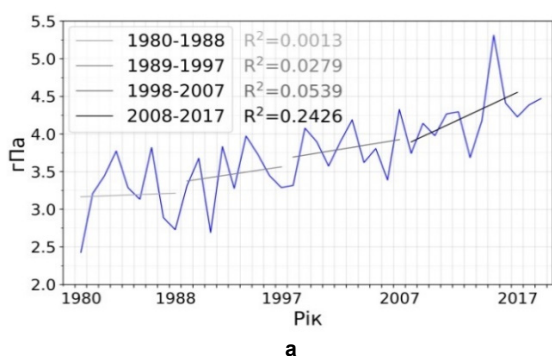


Рис. 10. Зміни дефіциту вологості повітря по етапах (а) та швидкості вітру за період з 1980 по 2019 р. (б) за даними МС "Хмільник"

Отже, приклад розвитку гідрогеологічної посухи в Україні добре демонструє тісний зв'язок та зумовленість водообміну у верхній частині розрізу не лише кліматичними і гідродинамічними, а й електродинамічними процесами та явищами. Комбінований аналіз геофізичної, метеорологічної, гідрогеологічної та гідрофізичної інформації доводить доцільність *продовження досліджень* щонайменше за трьома напрямками: 1) розробка комбінованих математичних моделей, що описують залежність інфільтраційного живлення від гідродинамічних (РГВ), метеорологічних (опадів, температура, дефіцит вологості повітря, швидкість вітру тощо), геофізичних (напруженість електричного поля приземної атмосфери) та геодинамічних чинників; 2) розвиток методології суміщених синхронних гідрометеорологічних, гідрогеологічних, гідрофізичних та геофізичних спостережень, вдосконалення відповідної апаратури; 3) розробка методів штучного локального регулювання заряду статичного електричного поля для поповнення запасів ґрунтових вод та протидії гідрогеологічній посуші.

Висновки. За даними 41-річних спостережень по моніторингових свердловинах у м. Хмільник визначено кількісні зміни живлення ґрунтових вод. Середнє багаторічне інфільтраційне живлення ґрунтових вод на ділянці з коливаннями РГВ в діапазоні 0,8–2,3 м від поверхні склало 145 мм/рік, а за РГВ 2,7–4,5 м – лише 14,7 мм/рік (діапазон змін від 129 мм до негативних значень). Значуща кореляція між річними значеннями інфільтрації та опадів за РГВ 0,8–2,3 м спостерігалась лише на першому етапі спостережень (1980–1988 рр.) і сягала 0,75. По сезонах значущий зв'язок з опадами існував лише до 1997 р. для літа й осені; на цьому етапі також відмічено високу кореляцію між температурою та інфільтрацією зимового періоду.

Зіставлення місячних, сезонних та річних сумарних значень живлення із значеннями режимоформуючих метеорологічних чинників підтверджує висновок про те, що в період глобального потепління переважного значення набувають нові чинники, що пов'язано з посиленням ролі раніше малозначущих механізмів вологоперенесення. В умовах зміни інфільтраційного режиму ґрунтових вод на інфільтраційно-випарний підвищилась роль конденсації пароподібної вологи у живленні ґрунтових вод, що є однією з головних ознак впливу глобального підвищення

температури на процеси водообміну. Процес надходження пароподібної вологи на РГВ регулюється знаком заряду статичного електричного поля приземного шару атмосфери. Завдяки додатним зарядам цього поля (а вірогідно й зменшенню сили вітру) низька кількість опадів за 2014–2017 рр. (середнє значення 524 мм) супроводжувалась високим живленням ґрунтових вод (160 мм – на 10 % вище норми), стабільним підземним стоком до річки в межах 90–100 м³/рік/м та навіть незначним зростанням РГВ.

Для прогнозових розрахунків інфільтрації слід використовувати не лише РГВ, температуру та кількість опадів, як це здебільшого прийнято, а й градієнти електричного струму, генерованого пружними силами (мікрогеодинамічними коливаннями земної поверхні) і електричними полями, які мають зв'язок із сонячною радіацією, атмосферними фронтами та опадами. Для виконання достовірних сценаріїв гідрогеологічних та гідрологічних прогнозів необхідно розвивати мережу балансових станцій, на яких можуть одночасно відстежуватися метеорологічні, гідрологічні, гідрофізичні та гідрогеологічні показники. Аналіз таких спостережень у поєднанні з регіональними характеристиками змін клімату та поверхневого стоку дозволить виконувати реалістичні прогнози для завчасного передбачення гідрогеологічної посухи.

Оцінка представлених результатів дослідження показує, що хвилеподібні коливальні рухи, які формуються у поверхневих відкладах під впливом гравітаційних і ротаційних сил, контролюють більшість енергомасообмінних процесів. Фізична сутність впливу геодинамічних коливань у породах представлена двома стадіями: 1) під час вібраційних процесів відбувається віджимання води з породи за принципом сепарації складових порід за щільністю; 2) переміщення електричними силами цих розчинів у напрямку горизонтів із від'ємними електричними потенціалами.

Отже, електричні поля та генеровані електричні струми, не пов'язані із сучасним підвищенням температури, здатні, в разі створення статичних полів із додатним зарядом, протидіяти загальним процесам виснаження ємнісних запасів ґрунтових вод.

Результати дослідження нових механізмів, що впливають на рух флюїдів у геологічному середовищі і циклічності їхньої зміни, є більш прогресивним підходом до прогнозування стану ресурсів не лише ґрунтових вод, але і підземних вод глибоких горизонтів.

Список використаних джерел

- Альтовський, М.Є., Коноплянцев, А.А. (1954). Методическое руководство по изучению режима подземных вод. "Госгеолтехиздат", 253.
- Бублясь, В.М. (2017). Електричні явища атмосфери і літосфери та їх роль у геологічних процесах. *Матеріали IV міжнар. геол. форуму до 60-річчя УкрДГРІ "Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука і виробництво"*, Київ, 19–24.
- Бублясь, В.М. (2006). Мікрогеодинамічні зони як елементарні складові структури літосфери і роль електромагнітних явищ в їх розвитку. *Збірник наукових праць КНУ "Енергетика Землі, її геолого-екологічні прояви, науково-практичне використання"*, Київ, 86–90.
- Бублясь, В.Н. (2010). Закономірності зміни напружено-деформаційного стану порід в мікрогеодинамічних зонах, розвинених в покривних відкладах рівнинних територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 51, 44–48.
- Бублясь, В.Н., Бублясь, М.В. (2013). Процеси і явища в мікрогеодинамічних зонах покривних відкладів рівнинних територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(60), 42–46.
- Бублясь, В.М., Шестопалов, В.М. (2001). Аномальні зони і їх роль в перерасподіленні радіонуклідів з поверхні ґрунту в підземні води. В кн. *Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа*. Ч. 1. Киев, 251–356.
- Вольфцун, И.Б. (1972). Расчеты элементов баланса грунтовых вод. Ленинград: Гидрометеиздат, 272.
- Гриневский, С.О. (2012). Оценка инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод на основе геогидрологических моделей. *Автореф. дис. ... д-ра геол.-минералог. наук: 25.00.07 гидрогеология*. Москва, 44. Отримано з <http://earthpapers.net/preview/354368/a/#?page=1>
- Жернов, И.Е. (1982). Динамика подземных вод. Киев, 323.
- Киселев, П.А. (1967). Гидродинамические принципы количественной оценки питания подземных вод на основе анализа их режима на территории Белоруссии. *Режим и баланс подземных вод*. Минск, 3–92.
- Лукнер, Л., Шестаков, В.М. (1986). Моделирование миграции подземных вод. Москва, 208.
- Ситников, А.Б., Головаченко, Ю.Г., Ткаченко, К.Д. (2003). Гидрогеологическая станция "Феофанія": многолетние исследования и результаты. Киев, 200.
- Ситников, А.Б. (2010). Вопросы миграции веществ в грунтах. К.: НАН Украины. Ін-т геол. наук, 626.
- Стан підземних вод України у 2019 році. (2020). Щорічник. Київ: ДНВП "ГЕОІНФОРМ України", 129.
- Ткаченко, К.Д. (1965). Баланс влаги в зоне аэрации. Киев, 144.
- Тэйлор, С.А., Кэри Дж. В. (1966). Анализ одновременных потоков воды и тепла или электричества с помощью термодинамики необратимых процессов. Термодинамика почвенной влаги. Ленинград.
- Шевченко, О.Л., Бублясь, В.М., Коломийць, С.С. (2016). Основи перенесення вологи в зоні аерації. Навч. посібник. Київ, 295.
- Шевченко, А.Л., Наседкин, И.Ю. (2001). Естественно-антропогенные особенности формирования водообмена и распространения радиоактивных веществ на мелиоративных системах гумидной зоны. В кн. *Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа*. Ч. 1. Киев, 162–232.
- Шевченко, О.Л., Осадчий, В.І. (2020). Прояви глобального потепління у змінах балансу підземних вод та річок. Ресурси природних вод Карпатського регіону. *Матеріали 19-ї міжнар. наук-практ. конф. "Проблеми охорони та раціонального використання"*, 8–9 жовтня 2020 р., м. Львів, 36-к наук. статей, 70–74.
- Шевченко, А.Л., Осадчий, В.І., Чарний, Д.В. (2019). Изменения режима. баланса и ресурсов подземных вод Полесья и лесостепи Украины под влиянием глобального потепления. *Вучоные записки Бресцкага універсітэта*, 15 (2), 117–128.
- Шевченко, О.Л., Скорбун, А.Д., Чарний, Д.В. (2021). Підпорядкованість коливань рівнів ґрунтових вод в басейні р. Південний Буг кліматичним змінам. *Вісник Одеського НУ. Сер.: Географічні та геологічні науки*, 26, 2(39), 175–194.
- Шевченко, А.Л., Чарний, Д.В., Осадчий, В.І., Ільченко А.О. (2021а). Стік ґрунтових вод у басейні річки Південний Буг в умовах глобального потепління. *Геологічний журнал*, 3, 3–16. doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237361
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. Mc Graw-Hill, Inc., New York.
- Brechtel, H.M. (1976). Influence of species and age of forest stands on evapotranspiration and ground water recharge in the Rhine-Main Valley. *Proceedings of XVI IUFRO World Congress, Oslo, Norway*.
- Busch, K.-F., Luckner, L. and Tiemer, K. (1993). *Geohydraulik*. In: Matthess, G. (Ed.) Gebrüder Bornträger. Berlin, Stuttgart, 3. Neubearbeitete Auflage.
- Di Matteo, L., Capoccioni, A., Porreca, M., Pauselli, C. (2021). Groundwater-Surface Water Interaction in the Nera River Basin (Central Italy): New Insight safter the 2016 Seismic Sequence. *Hydrology*, 8, 97.
- Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S. (2021). Using a water budget model to anticipate the impact of climate change on groundwater recharge at the regional scale in cold and humid climates – example of southern Quebec (Canada). *EGU General Assembly 2021, 19–30 Apr 2021*. EGU21-6039. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6039>.
- Carrera-Hernández, J.J., Smerdon, B.D., Mendoza, C.A. (2012). Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. *Journal of Hydrology*, 452–453, 90–101.
- Carvalho, K.S., Wang, S. (2019). Characterizing the Indian Ocean Sea level changes and potential coastal flooding impacts under global warming. *Journal of Hydrology*, 569, 373–386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.072>
- Chen, H., Wang, S., Wang, Y., Zhu, J. (2020). Probabilistic projections of hydrological droughts through Convection-Permitting climate simulations and multimodel hydrological predictions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125. 10.1029/2020JD032914.
- Gee, G.W., Hillel, D. (1988). Groundwater recharge in arid regions: review and critique of estimation methods. *Hydrological processes*, 2, 255–266.
- Healy, R.W., Cook, P.G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91–109.
- Kuzmak, J.H., Sereda, P.J. (1957). The mechanism by which water moves through a porous material subjected to a temperature gradient. *Soil science*, 84, (4, 5)
- Liu, C., Ikeda, K., Rasmussen, R., Barlage, M., Newman, A.J., Prein, A.F. et al. (2017). Continental-scale convection-permitting modeling of the current and future climate of North America. *Climate Dynamics*, 49(1–2), 71–95. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3327-9>
- Maxwell, R.M. (2010). Infiltration in arid environments: Spatial patterns between subsurface heterogeneity and water-energy balances. *Vadose Zone Journal*, 9, 970–983. DOI: 10.2136/vzj2010.0014
- Modarres, R. (2007). Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21(3), 223–233. <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0058-1>
- Osadchyi, V., Shevchenko, O., Krasovska, A. (2021). Formation features of river underground runoff under global warming conditions. *EGU General Assembly 2021, 19–30 Apr 2021*. EGU21-15311. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15311>
- Qurtas, S.Sh. (2018). Using ground water level sand specific yield to estimate the recharge. South of Erbil. Kurdistan Region. Iraq. *Academic Journal of Nawroz University, [S.I.]*, 7(4), 191–196. <https://doi.org/10.25007/ajnu.v7n4a289>
- Rasmussen, K.L., Prein, A.F., Rasmussen, R.M., Ikeda, K., Liu, C. (2017). Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States. *Climate Dynamics*, 55(1–2), 383–408. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4000-7>
- Tabari, H., Nikbakht, J., Talaei, P.H. (2013). Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water Resources Management*, 27(1), 137–151. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0173-3>

References

- Altovskiy, M.Ye., Konoplyantseva, A.A. (1954). Methodological guide to the study of the groundwater regime. Gosgeoltekhnizdat, 253. [in Russian]
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. Mc Graw-Hill, Inc., New York.
- Brechtel, H.M. (1976). Influence of species and age of forest stands on evapotranspiration and ground water recharge in the Rhine-Main Valley. *Proceedings of XVI IUFRO World Congress, Oslo, Norway*.
- Bublyas, V.M. (2017). Electrical phenomena of the atmosphere and lithosphere and their role in geological processes. *Materials of the IV International. geol. Forum for the 60th anniversary of UkrDGRI "Actual problems and prospects for the development of geology: science and production"*, Kyiv, 19–24. [in Ukrainian]
- Bublyas, V.M. (2006). Microgeodynamic zones as elementary structural components of the lithosphere and the role of electromagnetic phenomena in their development. *Collection of scientific works of KNU. Energy of the Earth. Its geological and ecological manifestations. Scientific and practical use*. Kyiv, 86–90. [in Ukrainian]
- Bublyas, V.M. (2010). Patterns of changes in the stress-strain state of rocks in microgeodynamic zones developed in the cover sediments of plain areas. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 51, 44–48. [in Ukrainian]
- Bublyas, V.N., Bublyas, M.V. (2013). Processes and phenomena in microgeodynamic zones of cover deposits of plain territories. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(60), 42–46. [in Ukrainian]
- Bublyas, V.M., Shestopalov, V.M. (2001). Anomalous zone sand their role in the redistribution of radionuclides from the soil surface to groundwater. In: *Water exchange in hydrogeological structures and the Chernobyl disaster*. Part 1. Kyiv, 251–356. [in Russian]
- Busch, K.-F., Luckner, L., Tiemer, K. (1993). *Geohydraulik*. In: Matthess, G. (Ed.) Gebrüder Bornträger. Berlin, Stuttgart, 3. Neubearbeitete Auflage.
- Carrera-Hernández, J.J., Smerdon, B.D., Mendoza, C.A. (2012). Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. *Journal of Hydrology*, 452–453, 90–101.
- Carvalho, K.S., Wang, S. (2019). Characterizing the Indian Ocean Sea level changes and potential coastal flooding impacts under global warming. *Journal of Hydrology*, 569, 373–386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.072>
- Chen, H., Wang, S., Wang, Y., Zhu, J. (2020). Probabilistic Projections of Hydrological Droughts Through Convection-Permitting Climate Simulations and Multimodel Hydrological Predictions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125.
- Di Matteo, L., Capoccioni, A., Porreca, M., Pauselli, C. (2021). Groundwater-Surface Water Interaction in the Nera River Basin (Central Italy): New Insight safter the 2016 Seismic Sequence. *Hydrology*, 8, 97.

- Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S. (2021). Using a water budget model to anticipate the impact of climate change on groundwater recharge at the regional scale in cold and humid climates – example of southern Quebec (Canada). EGU General Assembly 2021, 19–30 Apr 2021. EGU21-6039. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6039>.
- Gee, G.W., Hillel, D. (1988). Groundwater recharge in arid regions: review and critique of estimation methods. Hydrological processes, 2, 255–266.
- Grinevsky, S.O. (2012). Assessment of infiltration recharge and groundwater resources based on geohydrological models. Dissertation abstract for the competition doc. geol.-min. sciences in specialty "hydrogeology". Moscow, 44. <http://earthpapers.net/preview/354368/a#?page=1> [in Russian]
- Healy, R.W., Cook, P.G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal, 10, 91–109.
- Kiselev, P.A. (1967). Hydrodynamic principles of quantitative assessment of groundwater recharge based on the analysis of their regime on the territory of Belarus. Groundwater regime and balance. Minsk, 3–92.
- Kuzmak, J.H., Sereda, P.J. (1957). The mechanism by which water moves through a porous material subjected to a temperature gradient. Soil science, 84, (4, 5).
- Liu, C., Ikeda, K., Rasmussen, R., Barlage, M., Newman, A.J., Prein, A.F. et al. (2017). Continental-scale convection-permitting modeling of the current and future climate of North America. Climate Dynamics, 49(1–2), 71–95.
- Lukner L., Shestakov, V.M. (1986). Modeling of groundwater migration. Moscow, 208. [in Russian]
- Maxwell, R.M. (2010). Infiltration in arid environments: Spatial patterns between subsurface heterogeneity and water-energy balances. *Vadose Zone Journal*, 9, 970–983. DOI: 10.2136/vzj2010.0014
- Modarres, R. (2007). Streamflow drought time series forecasting. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 21(3), 223–233. <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0058-1>
- Osadchyi, V., Shevchenko, O., Krasovska, A. (2021). Formation features of river underground runoff under global warming conditions. EGU General Assembly 2021, 19–30 Apr 2021. EGU21-15311. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15311>
- Qurtas, S.Sh. (2018). Using groundwater levels and Specific Yield to Estimate the Recharge. South of Erbil. Kurdistan Region. Iraq. Academic Journal of Nawroz University, [S.l.], 7(4), 191–196. <https://doi.org/10.25007/ajnu.v7n4a289>
- Rasmussen, K.L., Prein, A.F., Rasmussen, R.M., Ikeda, K., Liu, C. (2017). Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States. Climate Dynamics, 55(1–2), 383–408. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4000-7>
- Shevchenko, O.L., Bublyas', V.M., Kolomiets, S.S. (2016). Basics of moisture transfer in the aeration zone. Training manual. Kyiv, 295. [in Ukrainian]
- Shevchenko, A.L., Nasedkin, I.Yu. (2001). Natural and anthropogenic features of water exchange formation and distribution of radioactive substances on reclamation systems of the humid zone. In: Water exchange in hydrogeological structures and the Chernobyl disaster. Part 1. Kiev, 162–232. [in Russian]
- Shevchenko, O.L., Osadchyi, V.I. (2020). Manifestations of global warming in changes in the balance of groundwater and rivers. Natural water resources of the Carpathian region. Materials of the 19th intern. conf. "Problems of protection and rational use", October 8–9, 2020, Lviv, 70–74. [in Ukrainian]
- Shevchenko, A.L., Osadchyi, V.I., Charny, D.V. (2019). Mode changes, balance and resources of groundwaters of Polesia and forest-steppe of Ukraine under the influence of global warming. Academic notes of Brest University, 15(2), 117–128. [in Russian]
- Shevchenko, O.L., Skorbun, A.D., Charny, D.V. (2021). Subordination of groundwater level fluctuations in the Southern Bug River basin to climatic changes. Visnyk of Odesa National University. Ser.: Geographical and geological sciences, 26, 2(39), 175–194. [in Ukrainian]
- Shevchenko, A.L., Charny, D.V., Osadchyi, V.I., Il'chenko, A.O. (2021a). Groundwater flow in the Southern Bug basin river in conditions of global warming. Geological journal, 3, 3–16. [in Ukrainian]
- Sitnikov, A.B., Golovchenko, Yu.G., Tkachenko, K.D. (2003). Hydrogeological station "Feofaniya": long-term studies and results. Kyiv, 200. [in Russian]
- Sitnikov, A.B. (2010). Issues of migration of substances in soils. Kyiv, 626. [in Russian]
- Tabari, H., Nikbakht, J., Talaei, P.H. (2013). Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water Resources Management*, 27(1), 137–151. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0173-3>
- Taylor, S.A., Carey, J.V. (1966). Analysis of simultaneous flows of water and heat or electricity with the help of thermodynamics of irreversible processes. Thermodynamics of soil moisture. Leningrad. [in Russian]
- The state of groundwater in Ukraine in 2019. (2020). Shchorichnyk, Kyiv: DNVP "GEOINFORM of Ukraine", 129. http://geoinf.kiev.ua/Schorichnyk_PV_2019.pdf. [in Ukrainian]
- Tkachenko, K.D. (1965). Moisture balance in the aeration zone. Kyiv: "Scientific Thought", 144. [in Russian]
- Zhernov, I.E. (1982). Dynamics of underground waters. Kyiv, 323. [in Russian]
- Wolfzun, I.B. (1972). Calculations of groundwater balance elements. Leningrad, 272. [in Russian]

Надійшла до редколегії 14.08.22

O. Shevchenko, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: shevch62@gmail.com,
Ukrainian Hydrometeorological Institute NAS of Ukraine,
37 Nauki Ave., Kyiv, 03028, Ukraine;
V. Bublyas, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: bubliav51@gmail.com,
Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine,
55-b O. Honchara Str., Kyiv, 01054, Ukraine;
D. Oshurok, PhD (Geogr.), Senior Researcher,
E-mail: oshurok.dm@gmail.com,
Ukrainian Hydrometeorological Institute NAS of Ukraine,
37 Nauki Ave., Kyiv, 03028, Ukraine

COMBINATION OF GEOPHYSICAL AND HYDROGEOLOGICAL DATA TO EXPLAIN CONTRADICTIONS BETWEEN INFILTRATION AND ATMOSPHERIC PRECIPITATION

A traditional and non-standard approach to the analysis of estimated values of groundwater infiltration feeding using the charge sign of the electric field of the surface atmosphere is considered. A comparison of the results of hydrogeological calculations and observations from specific electrophysical and meteorological factors made it possible to explain the discrepancies between the values of infiltration nutrition and the amount of precipitation.

The daily values of groundwater recharge were determined based on 41-year observations in wells in the city Khmelnyk. The average long-term value of infiltration recharge of groundwater from GWT 0.8–2.3 m was 145 mm, from GWT 2.7–4.5 m – 14.7 mm (fluctuations in the range from 129 mm to negative values). A significant correlation between the annual values of infiltration and precipitation at GWT 0.8–2.3 m was observed only at the first stage of observations (1980–1988). However, there are also significant contradictions in the ratios of infiltration and precipitation, which could be explained only by involving the data of our own electrophysical observations. For the period from 2008 to 2017, the negative values of the "infiltration-temperature" correlation coefficients for the summer season changed to positive ones, which suggests an increase in the importance of moisture transfer mechanisms in the form of steam. Data on the charge sign of the static electric field of the surface layer of the atmosphere support this conclusion. At high values of the intensity of the static electric field (E) with a negative sign, the direction of moisture movement has an upward character, thanks to which evaporation from the aeration zone increases several times compared to what happens at zero values of E. And the intensity of the electric field with a positive sign forms a downward movement of moisture, which leads to an increase of GWT. From this, the cases when low values of infiltration nutrition were obtained with a significant amount of precipitation become more understandable. Conversely, the low amount of precipitation in 2014–2017 (average value 524 mm) was accompanied by high groundwater recharge (160 mm – 10 % above the norm), stable underground flow to the river in the range of 90–100 m³/year/m and by the growth of GWT due to the positive values of the static electric field and the decrease in wind strength. This electrical factor has such a powerful influence that it is able to neutralize and effectively counteract the negative impact on groundwater recharge of temperature rise and air humidity deficiency.

Since electrodynamic processes have a significant and sometimes decisive role not only in moisture transport in the aeration zone, but also in regional processes of groundwater feeding, the creation of artificial positively charged static fields above the soil surface can become the most effective safeguard against the depletion of groundwater reserves during hydrogeological drought.

Keywords: infiltration, supply, unloading, groundwater levels, regime, temperature, precipitation, balance, aeration zone, electrodynamics.

УДК 621.22+556.06

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.14>

О. Ободовський, д-р геогр. наук, проф.,

E-mail: obodovskiy@univ.kiev.ua;

О. Кривець, канд. геогр. наук,

E-mail: like_mila@ukr.net;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
географічний факультет, пр. Глушкова, 2, м. Київ, Україна

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ МАЛОЇ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РІЧОК УКРАЇНИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Встановлено основні напрямки та виконано аналіз досліджень у галузі гідроенергетики та гідроенергетичного потенціалу річок України. Здійснено короткий огляд класифікації малих ГЕС. Розглянуто оцінки гідроенергетичного потенціалу річок. Відтінено екологічні аспекти використання гідроенергетичного потенціалу річок. Проаналізовано тенденції розвитку української енергетики і, зокрема, гідроенергетики. Показано роль "зеленого" тарифу на електричну енергію, вироблену малою гідроенергетикою. Висвітлено роль "Енергетичної стратегії України на період до 2030 року" в галузі малої гідроенергетики. Дано характеристику методичним підходам оцінки впливу на довкілля під час будівництва малих ГЕС. Оцінено перспективи використання гідроенергетичного потенціалу річок України та запропоновано нову технологічну парадигму розвитку малої гідроенергетики України.

Ключові слова: методичні підходи становлення малої гідроенергетики, оцінка гідроенергетичного потенціалу річок України, екологічні аспекти використання гідроенергетичного потенціалу річок, класифікація малих ГЕС, УВМГЕС та їх ефективність.

Вступ. Зростання вартості традиційних енергоресурсів та їх вичерпність спонукає до збільшення питомої ваги альтернативних відновлювальних енергетичних джерел, що є актуальним для зміцнення енергонебезпечності та енергобезпеки держави. З огляду на це та враховуючи положення програми Кабінету Міністрів України щодо розвитку гідроенергетики на період до 2026 р., зростає потреба у диверсифікації гідроенергетичних комплексів України, зокрема за рахунок малої гідроенергетики, на яку встановлюється "зелений" тариф. Тому використання енергетичного потенціалу річок України є одним з ключових напрямків вирішення забезпечення енергетичних потреб економіки країни (*Гідроecологічна оцінка...*, 2020).

Мета роботи – аналітичний огляд досліджень та перспективи їх розвитку в галузі гідроенергетики та гідроенергетичного потенціалу річок.

Аналіз попередніх досліджень. На сьогодні існує доволі значна кількість досліджень у галузі гідроенергетики та гідроенергетичного потенціалу річок України, які можна згрупувати у такі основні напрями:

- етапи становлення малої гідроенергетики в Україні.

Наукові праці, присвячені проблематиці використання гідроенергетичного потенціалу малих річок, поділяються на етапи активного нагромадження знань (1940–60-ті рр.) та їхнього аналізу (1990–2000-ні рр.) та етап, протягом якого кількість наукових праць на цю тематику значно зменшується (1970–90-ті рр.);

- будівництво малих гідроелектростанцій та їх економічна ефективність. Цей напрям об'єднує наукові дослідження, що стосуються як загальнотеоретичних питань малої гідроенергетики, так і практичних аспектів, наприклад, проектування малих ГЕС, пошукових досліджень для цілей будівництва малих ГЕС, а також економічних передумов відновлення малої гідроенергетики;

- розроблення, виробництво та вдосконалення обладнання для малих ГЕС. Прикладні наукові дослідження в галузі малої гідроенергетики здійснюються в Інституті відновлюваної енергетики НАН України (ІВЕ НАН України). Зокрема, створено інформаційну базу універсальних зведених гідромеханічних характеристик турбін вітчизняної розробки для малих гідроелектростанцій за зміни частоти обертання та витрат води в діапазонах (0,6–1,3) номінального значення для таких

конструктивних схем: пропелерних – 11 типів турбін; поворотно-лопатевої – 12 типів турбін; радіально-осьових – 20 типів турбін. ІВЕ НАН України має важливі розробки зі створення енергоефективної техніки та технологій у галузі малої гідроенергетики (*Васько та ін.*, 2012; *Голованов*, 2007, 2012). Розроблення та удосконалення обладнання для малих ГЕС здійснюється також на базі Вінницького національного технічного університету (*Хоменко, Лежнюк*, 2012), у Національному університеті водного господарства та природокористування, інших закладах і підприємствах (*Касян, Лебедь*, 2011). Окрім традиційних для малої гідроенергетики дериваційних, пригребельних і руслових ГЕС, у КНУ імені Тараса Шевченка проведено наукові дослідження, присвячені розробленню безгребельних малих ГЕС (*Гідроecологічна оцінка...*, 2015, 2016, 2017, 2020);

- гідроенергетичний потенціал річок України. Вперше питання про гідроенергетичний потенціал малих річок України було поставлене у 20-х рр. XX ст. У 1926 р. здійснено спробу визначити потенціальну енергію 13 малих річок України, яка оцінювалась у 178 тис. кВт (цю величину було прийнято як максимальну потужність річок за витрати 50 % забезпеченості). Дослідження з метою визначення гідроенергетичного потенціалу малих річок УРСР здійснювались і в 1936, 1946, 1947 рр., однак використання різних методик і недостатня точність робіт стали причиною значних відмінностей в отриманих результатах (*Гідроecологічна оцінка...*, 2020). Найбільш повними вважаються дані, отримані у 1950-ті рр., коли гідроенергетичний потенціал малих річок визначався шляхом розбивання річок на ділянки, межі яких вибирались по точках зміни похилів і по місцю впадіння приток. Водночас приймавалось, що мінімальна потужність ГЕС повинна бути понад 20 кВт. За отриманими результатами потенційні ресурси малих річок України сягали 19,6 млрд кВт·год. У подальших дослідженнях гідроенергетичний потенціал малих річок України уточнювався, і, наприклад, у працях (*Атлас енергетичного потенціалу...*, 2018) загальний потенціал малої гідроенергетики України оцінюється вже в 12501 млн кВт·год/рік (на 7101,4 млн кВт·год/рік менше, ніж за даними 50-х рр.).

З 2014 і до 2020 р. дослідження гідроенергетичного потенціалу річок України проводила дослідницька група

© Ободовський О., Кривець О., 2023

з НДС "Гідроєкології і гідрохімії" географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка під керівництвом професора О.Г. Ободовського (*Obodovskiy et al., 2020; Hydropower Potential Assessment ..., 2021; Ободовський та ін., 2017, 2016*);

- **екологічні аспекти використання гідроенергетичного потенціалу річок.** Питання, пов'язані з можливими загрозами природному середовищу через будівництво малих гідроелектростанцій, тривалий час розглядаються дослідниками, однак консенсусу в цьому напрямі не досягнуто. У наукових колах активно пропагуються дві взаємопротилежні позиції щодо екологічних наслідків такого будівництва. Згідно з однією позицією – малі ГЕС здійснюють мінімальний вплив на природне середовище, згідно з іншою – завдають шкоди не тільки іхтіофауні басейну, але і рослинному й тваринному світу прибережних територій, можуть стати причиною катастрофічного обміління малих річок і зникнення води у колодязях, спотворюють природні річкові долини, змінюють ландшафти тощо. Окремі дослідження підтверджують, що наслідки впливу на природне середовище при спорудженні малих гідроелектростанцій, зокрема при створенні водосховищ, можуть бути в одних аспектах позитивними (наприклад, активізація процесів самоочищення за рахунок розбавлення води, збагачення її киснем тощо), в інших – негативними (розвиток процесів заболочення, зміна мікроклімату тощо). Тому важливого значення набувають природоохоронні заходи, що передбачають мінімізацію порушень у природному середовищі (*Віхорев, Соловійов, 2013*).

Л.М. Архипова та ін. вважають безпечнішими для доквілля дериваційні ГЕС (*Архипова, 2011*). А з метою недопущення пересихання русел, що є одним із аргументів проти спорудження малих ГЕС дериваційного типу, дослідниця пропонує в руслах (за межами дериваційного каналу) залишати меженний стік – протягом усього року на рівні мінімальної середньомісячної витрати маловодного року 75 % забезпеченості (*Білецький, 2014*). Небезпеки дериваційних ГЕС, окрім обміління річок, полягають у можливості зниження рівнів ґрунтових вод, зменшенні кисню у воді через перегрів обмілілої річки влітку тощо (*Висновки громадської експертизи ..., 2012*).

Разом з тим у роботах (*Гідроєкологічна оцінка ..., 2015, 2016, 2017, 2020; Obodovskiy et al., 2020; Hydropower Potential Assessment ..., 2021; Ободовський та ін., 2017*) запропоновано нові підходи до встановлення екологічного гідроенергетичного потенціалу річок;

- **методичні підходи до розрахунків гідроенергетичного потенціалу.** Гідроенергетичний потенціал – це здатність частини річкового стоку, що використовується, або тієї, що може бути використана, до виробництва електроенергії, необхідної людині в певних масштабах без зміни основних властивостей водного об'єкта за певний період (*Цепенда, 2009*). Методичні питання щодо оцінювання гідроенергетичного потенціалу річок набули актуальності починаючи з 50-х рр. XX ст. напередодні спорудження перших великих ГЕС у СРСР. Одними з перших у цьому напрямі були розробки інституту Гідроенергопроект (*Яцук ін., 2011*). Серед інших робіт 50-х рр. заслуговують на увагу праці, у яких чітко виписані методика розрахунку потенційних гідроенергетичних ресурсів, методика розрахунку потенційних гідроенергетичних ресурсів басейну та оцінювання гідроенергетичних ресурсів, що реально використовуються.

Удосконалені підходи до встановлення гідроенергетичного потенціалу річок запропоновані в роботах (*Гідроєкологічна оцінка ..., 2015, 2016, 2017; Obodovskiy et al., 2020; Ободовський та ін., 2017*);

- **зарубіжний досвід у галузі малої гідроенергетики.** Виходячи із зарубіжного досвіду, мала гідроенергетика є економічно вигідним і перспективним напрямом у виробництві електроенергії із відновлюваних джерел. Малі ГЕС вважаються інвестиційно привабливими об'єктами для кредитування, і, як наслідок – гідроенергетичний потенціал більшості розвинених країн Західної Європи і Північної Америки значною мірою вже використовується (на 75 і 69 % відповідно). До 2035 р. гідроенергетика залишатиметься основним виробником відновлюваної електроенергії у світі (*Survey of Energy Resources, 2007*), водночас темпи зростання виробництва електроенергії на малих ГЕС до 2030 р. випереджатимуть темпи зростання виробництва на великих ГЕС більше ніж удвічі;

- **відновлення об'єктів критичної інфраструктури, зруйнованих унаслідок повномасштабного російського вторгнення, та побудова нових об'єктів.** У національному плані відновлення України (*План відновлення України, 2022*), представленому на конференції в Лугано, запропонована національна програма 4 "Енергетична безпека та перехід", у пункті програми 4В "Підтримка зеленого енергетичного переходу ЄС" задекларовано підпункт 4В.1. Будівництво 5–10 ГВт ВДЕ та 3,5 ГВт ГЕС та ГАЕС (може бути вища потужність залежно від потенційного експорту). Отже, дана тематика є актуальною. Наукові дослідження та їх результати можуть стати раціональним ресурсом для реалізації даної програми з національного плану відновлення України.

Виклад основного матеріалу. Класифікації ГЕС. За встановленою потужністю (*Енергетика: історія ..., н.д.*) ГЕС поділяють на потужні – понад 1000 МВт, середньої потужності – від 30 до 1000 МВт, малої потужності (малі ГЕС) – менш як 30 МВт.

На сьогодні існує чимало класифікацій малих ГЕС: за способом створення напору, схемою основних споруд, конструкцією будівлі ГЕС, потужністю, напором, розмірами робочого колеса турбіни і т. ін. Важливою характеристикою малих ГЕС є максимальна потужність, яку може розвинути електростанція. За цим показником всі гідроелектростанції малої потужності поділяються на малі ГЕС, міні-ГЕС, мікро-ГЕС (у альпійській зоні Швейцарії – ще й піко-ГЕС). Однак у світовій практиці немає єдиної загальноприйнятої класифікації, яка б чітко визначала верхню межу потужності, за якої ГЕС вважається малою (табл. 1, (*Рябенко, Лутаєв, 2012*)).

В Україні, згідно із Законом "Про внесення змін до Закону України "Про електроенергетику" щодо стимулювання виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії" (*Атлас енергетичного потенціалу ..., 2018*) встановлена потужність мікро-ГЕС не перевищує 200 кВт, міні-ГЕС – від 200 кВт до 1 МВт, малої ГЕС – 1–10 МВт.

Мікро-ГЕС (<0,2 МВт) використовуються для електропостачання сільських населених пунктів, невеликих промислових підприємств тощо. Вони розташовуються безпосередньо у водотоці або у створі із зосередженням напором. Мікро-ГЕС доцільні для використання у регіонах, ізольованих від енергосистеми (*Обухов, 1999*).

За способом створення напору малі гідроелектростанції поділяють на гребельні, дериваційні та змішані (*Енергетика: історія ..., н.д.*). На гребельних ГЕС напір створюється підпором рівня річки греблею з утворенням водосховища. Такі ГЕС споруджуються як на рівнинних, так і на гірських річках. Дериваційними називаються ГЕС, напір на яких забезпечується створенням перепаду шляхом відведення води водоводом (трубопроводом, каналом або тунелем) до гідротурбіни. Зазвичай такі ГЕС будують на гірських річках, які характеризуються

великими похилами і малими витратами води, оскільки в таких умовах відносно невелика довжина дериваційного водоводу забезпечує великий напір. На змішаних

(гребельно-дериваційних) ГЕС напір утворюється за рахунок підпору рівня ріки греблею і створення водосховища, з якого вода відводиться у дериваційний канал.

Таблиця 1

Класифікації ГЕС малої потужності

Країни і організації	Мікро-ГЕС, кВт	Міні-ГЕС, кВт	Малі ГЕС, кВт
Міжнародна мережа малої гідроенергетики	≤ 100	101–500	501–10000
UNIDO (Організація розвитку промисловості ООН)	≤ 100	101–2000	2001–10000
ESHA (Європейська асоціація малої гідроенергетики)	–	–	≤ 15000
OLADE (Латиноамериканська енергетична організація)	≤ 50	51–500	501–5000
Китай	≤ 100	101–500	501–50000
США	≤ 500	501–2000	2001–30000
Канада	–	≤ 1000	1001–30000
Німеччина	≤ 500	501–1000	1001–5000
Швеція	–	–	101–15000
Норвегія, Японія, Бразилія	–	–	≤ 10000
Італія, Латвія	–	–	< 3000
Україна	≤ 200	201–1000	1001–10000

Залежно від величини напору і розміщення споруди ГЕС, гребельні ГЕС поділяються на руслові і пригребельні, а дериваційні – на ГЕС із безнапірною і напірною деривацією.

У руслових ГЕС машинна споруда, як і гребля, створює напір і сприймає тиск з верхнього б'єфа. Спорудження таких ГЕС характерне для рівнинних річок, які мають невеликий похил. У пригребельних ГЕС напір створює лише гребля, сама ж будівля ГЕС розташовується за греблею і не сприймає тиску води зі сторони верхнього б'єфа. Пригребельні ГЕС будують на гірських і передгірських ділянках річок, а також на рівнинних річках із глибоко врізаним руслом.

У КНУ імені Тараса Шевченка запропоновано універсальну високоекологічну малу гідроелектростанцію (УВМГЕС) (Онищук, Ободовський, 10.07.2015, 27.10.2014, 10.02.2017, 10.04.2017, 11.12.2017, 26.11.2018, 26.12.2019, 10.01.2020; Онищук та ін., 26.12.2017, 25.04.2018, 26.11.2018). Вона містить у собі турбіну на одному валу з генератором електричного струму. Сама турбіна знаходиться на опорі і має зверху подвійну обкладку. При цьому УВМГЕС має форсунку з подвійною обкладкою, яка розміщена між турбіною та підвідним напірним трубопроводом. Сама будівля станції розташована на заплаві біля самого русла або біля схилу долини чи за дамбою обвалування. Поруч розміщений акумулювальний басейн, в який надходить річкова вода через перепускную трубу. З останнього за допомогою гідравлічного сифона вона подається у зрівноважувальну ємність, розміщену на пальових опорах, з якої відбувається заповнення деривації (яка складається з напірного трубопроводу і форсунки). Відвід води з кільцевого басейну здійснюється за допомогою скидного трубопроводу в буферну ємність, де вона має частково звільнитись від молекул озону. Із цього басейну вода перекачується гідравлічним сифоном у достатньо високу ємність (заввишки не більш як 6 м, що відповідає робочим характеристикам існуючих сифонів), що дає змогу скидною трубою направитись у річку. Універсальність даного винаходу пояснюється тим, що таку конструкцію деривації можна використати для нових ГЕС на будь-якому водному об'єкті (гірській чи рівнинній річці, озері, водосховищі або біля наливного басейну) (Онищук, Ободовський, 27.10.2014).

Перевагами малої гідроенергетики вважається те, що вона характеризується прогнозованим відновлюваним енергоресурсом, низькою вартістю виробництва електроенергії порівняно з іншими джерелами,

тривалим періодом експлуатації обладнання і споруд ГЕС (експлуатаційний ресурс обладнання становить 40 років, гідроспоруд – 100 років), унікальними маневровими й мобільними властивостями (Віхорев, Соловйов, 2013). Позитивними аспектами є також незалежність від палива, відсутність відходів виробництва, зменшення обсягів викидів шкідливих речовин у атмосферу (оскільки гідроенергетика заміщує використання викопного органічного палива), невеликі терміни проектування, зведення та монтажу малих ГЕС, незначні капіталовкладення для їх спорудження та невеликий об'єм будівельних і монтажних робіт при зведенні, застосування спрощених схем виконання робіт і конструктивних рішень, низькі експлуатаційні витрати, розширення можливостей рекреації, риборозведення, виконання функцій протиаварійного захисту територій тощо.

У 2018 р. в Україні було вироблено 159 351 ГВт·год електроенергії. З них 7–10 % електроенергії виробляють гідроелектростанції, які перебувають на балансі "Укргідроенерго" (Огляд енергетичного ..., 2019).

Щодо регіонального розподілу діючих малих ГЕС (МГЕС) у 2020 р., то найбільше їх було у: Хмельницькій (28), Вінницькій (25) та Житомирській (19) областях. Значна кількість МГЕС розташована у Закарпатській (13), Черкаській, (12), Тернопільській (12), Кіровоградській (10) та Полтавській (8) областях, а найменша – в Івано-Франківській (5), Сумській (4), Київській (4), Чернівецькій (3), Львівській (2), Рівненській (2), Миколаївській (2), Чернігівській (1), Одеській (1), Харківській (1), Донецькій (1), Запорізькій (1), Херсонській (1) та Дніпропетровській (1) областях.

Сьогодні в Україні діють понад 30 приватних компаній, що інвестують у відновлювальну енергетику. Найбільші з них: "AICE Hydro A/S" (приватна компанія, Норвегія), "ANDRITZ Hydro" (дочірня компанія "ANDRITZ Technology Group", Австрія), ЗЕА "Новосвіт", ТОВ "Енергоінвест" та ін. Інвестиції направлені були переважно у Вінницьку, Черкаську, Хмельницьку, Тернопільську та Житомирську області. На сьогодні тут розташовано 64 % загальної кількості станцій, тоді як технічний гідропотенціал малих річок у цих областях становить всього 14 %.

Станом на 2020 р. в Україні діє 157 МГЕС загальною потужністю 113,993 МВт (Гідрокологічна оцінка ..., 2020).

Оцінка гідроенергетичного потенціалу річок. У 1956 р. Комітет з електроенергії Європейської економічної комісії ООН з метою упорядкування розрахунків гідроенергетичних ресурсів окремих країн прийняв рекомендації з визначення основних категорій гідроенергетичного потенціалу, а також з методики його оцінки.

Ці рекомендації встановлювали таку класифікацію у визначенні потенціалу:

1. Теоретичний валовий (брутто) гідроенергетичний потенціал:

а) поверхневий, який враховує енергію стікаючих вод на території цілого району або окремого річкового басейну;

б) річковий, що враховує енергію водотоку.

2. Експлуатаційний чистий (нетто) гідроенергетичний потенціал:

а) технічний – частина теоретичного валового річкового потенціалу, яка технічно може бути використана або вже використовується;

б) економічний – частина технічного потенціалу, використання якої в реальних умовах економічно може бути виправдане.

Методичним аспектам оцінювання гідроенергетичного потенціалу малих річок присвячені праці (Васько та ін., 2012 та інші). За М.М. Цепендою (Цепенда, 2009), для розрахунку теоретичного валового гідроенергетичного потенціалу варто використовувати лише річковий потенціал, оскільки поверхневий гідроенергетичний потенціал врахувати на сьогодні немає можливості. Для визначення річкового теоретичного гідроенергетичного потенціалу в практиці розрахунків використовуються такі методи, як метод "лінійного обліку" ("подільного обліку"); метод наближеної оцінки енергоресурсів за кількісним зв'язком між потенційною і умовною теоретичною потужністю потоку; метод "середньої річки".

В Атласі енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України на основі бази розрахункових даних представлено осучаснені показники річного технічно-досяжного енергетичного потенціалу відновлюваних джерел України, який можна реалізувати за допомогою технічних засобів для наступних напрямів освоєння: енергія вітру, сонячна енергія, енергія малих річок, геотермальна енергія, енергія біомаси. Інформаційно-аналітична система оцінки енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України являє собою єдине інформаційне середовище із взаємозв'язаною картографічною і цифровою інформацією, довідковим, методичним та програмним забезпеченням. У рамках цієї структури в Атласі застосовано сучасні засоби комп'ютерного картографування інформації. Інформаційну підтримку реалізовано шляхом розробки нових і удосконалення відомих методик, а також використання лише валідних даних довгострокових спостережень. Додатково представлено інформацію щодо розміщення об'єктів на основі відновлюваних джерел енергії, впроваджених на сьогодні на території областей України (Атлас енергетичного потенціалу ..., 2018).

Дослідницька група з НДС гідроекології та гідрохімії географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка провела детальні дослідження гідроенергетичного потенціалу річок України (Гідроекологічна оцінка ..., 2015, 2016, 2017, 2020). Всього для оцінювання було залучено 1824 річок із площами водозбору, не менших за 100 км² та середніми багаторічними витратами води понад 0,3 м³/с для рівнинних та 30 км² річок (завдовжки не менш як 10 км) і витратами води понад 0,3–0,7 м³/с для гірських річок. На основі повздовжніх профілів річок та з урахуванням річкової мережі на всіх досліджуваних річках було виділено 4630 ділянок для встановлення гідроенергетичного потенціалу. Виявлено, що розподіл показників загального гідроенергетичного потенціалу районів річкових басейнів України у цілому сягає 3459457 кВт (майже 3459,5 МВт). Загальний гідроенергетичний потенціал

річки Дніпро в природних умовах водного стоку становить близько 1365 МВт. Отже, загальний гідроенергетичний потенціал річок України згідно з новим гідрографічним її районуванням (Гребін та ін., 2013) сягає 4824,5 МВт (Гідроекологічна оцінка ..., 2017, 2020).

Крім того, були розроблені методики визначення екологічного та технічно можливого гідроенергетичних потенціалів річок і експертної оцінки збалансованого розміщення необхідної кількості малих гідроелектростанцій на території суббасейнів України. Зокрема, рекомендується п'ятибальна експертна оцінка екологічного техніко-економічно можливого використання гідроенергетичного потенціалу річок з урахування збалансованого розміщення високоекологічних малих ГЕС (Obodovskiy et al., 2020; Hydropower Potential Assessment ..., 2021; Ободовський та ін., 2017, 2016).

Екологічні аспекти використання гідроенергетичного потенціалу річок. Екологічний підхід дає змогу збалансовано використовувати гідроенергетичний потенціал річок України. Важливим екологічним аспектом використання гідроенергетичного потенціалу річок є врахування наявності природоохоронних зон усіх типів при будівництві об'єктів малої гідроенергетики (Гідроекологічна оцінка ..., 2016, 2017).

Інноваційними є розробки науковців Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Онищук, Ободовський, 10.07.2015, 27.10.2014, 10.02.2017, 10.04.2017, 11.12.2017, 26.11.2018, 26.12.2019, 10.01.2020; Онищук та ін., 26.12.2017, 25.04.2018, 26.11.2018). Серед них: патенти на корисні моделі способів розміщення і конструктивних особливостей малих високоекологічних ГЕС та технологій їх оптимізації, раціоналізації, інновацій та використання на гірських та рівнинних річках.

Вирішуючи питання про доцільність чи недоцільність використання гідроенергетичного потенціалу малих річок, слід усвідомлювати, що будь-яка мала ГЕС спричиняє певні небажані наслідки у природному середовищі. Адже навіть один із законів екології, сформульований Б. Коммонером, говорить про те, що "ніщо не дається дарма", тобто будь-яке досягнення супроводжується певними втратами. Саме тому важливе значення має об'єктивна оцінка всіх переваг і недоліків спорудження малих ГЕС (як і виробництва електроенергії за допомогою інших джерел). Тому підходи до використання саме високоекологічних малих гідроелектростанцій є актуальними і перспективними в цьому контексті (Гідроекологічна оцінка ..., 2015, 2016, 2017, 2020).

Сучасний стан і перспективи подальших досліджень. Тенденції розвитку української енергетики. Розгляд проблем та перспектив розвитку малої гідроенергетики в Україні неможливий без аналізу сучасного стану галузі. Для аналізу візьмемо індикатор енергетичного виробництва – динаміку виробництва первинної енергії. За статистичними даними, що оприлюднені Державною службою статистики України в збірнику "Паливно-енергетичні ресурси України" за 2018 р., динаміка виробництва первинної енергії за джерелами виробництва з 2007 по 2018 р. характеризується тенденцією до зменшення виробництва електроенергії з вугілля та торфу, а також із сирової нафти; стабільні показники виробництва електроенергії в галузі атомної енергетики та з природного газу. У цей же час частка виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії: гідро, вітрової та сонячної – дуже мала. Проте простежується тренд зростання частки виробленої енергії з біопалива та відходів (рис. 1) (Огляд енергетичного ..., 2019).

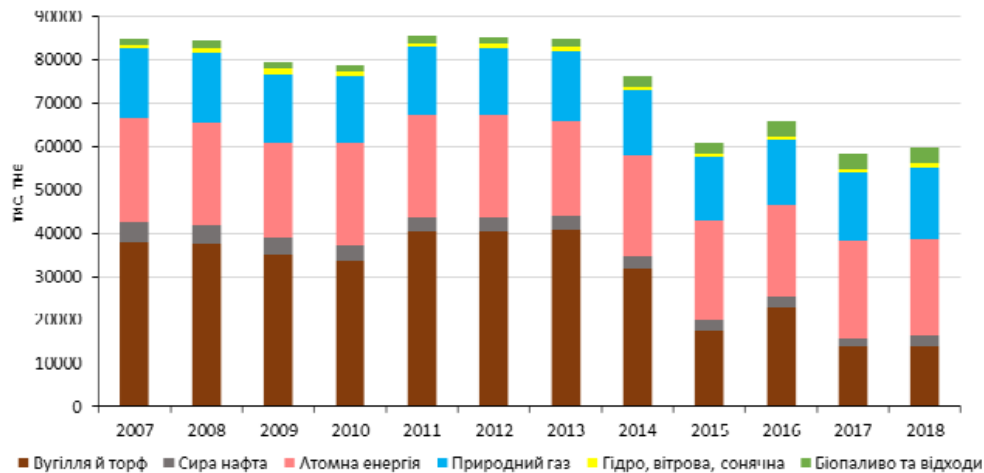


Рис. 1. Виробництво первинної енергії

У 2018 р. виробництво електроенергії з відновлюваних джерел енергії в Україні становило 8,2 % (13 млрд кВт·год.) від загального виробництва електроенергії. У структурі виробництва переважає виробництво електроенергії на ГЕС – 6,5 % (10,4 млрд кВт·год.). Слід

зазначити, що частка у виробництві електроенергії вітрових електростанцій, сонячних електростанцій і біопалива та відходів доволі мала: 0,8 % (1,2 млрд кВт·год.), 0,7 % (1,1 млрд кВт·год.), 0,2 % (0,3 млрд кВт·год.) відповідно (рис. 2) (Огляд енергетичного..., 2019).

13 млрд кВт·год всього – це 8,2% загального виробництва електроенергії.

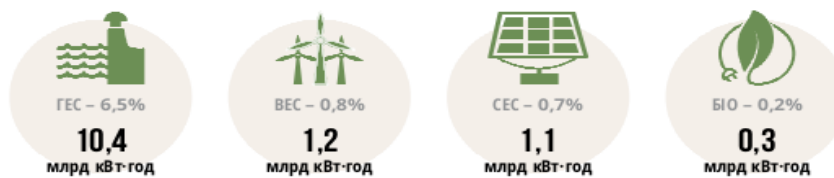


Рис. 2. Виробництво електроенергії з ВДЕ в Україні в 2018 р.

Аналізуючи сучасний стан галузі, не можна не враховувати фактор кон'юнктури енергетичного ринку України. За офіційними статистичними даними, у 2018 р. попит споживачів на електроенергію, вироблену з відновлюваних джерел енергії, менший від існуючої пропозиції на ринку. Що підтверджує неконкурентоспроможність "зелених тарифів" на енергетичному

ринку (рис. 3) (Огляд енергетичного ..., 2019). У той час у світі за останні 15 років спостерігається тренд до зростання потужностей відновлюваної енергетики і, зокрема, зростання частки потужностей гідроенергетики у структурі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) до 50 % (Паливно-енергетичні ресурси України, 2018).



Рис. 3. Структура загального (а) постачання первинної енергії і кінцевого (б) споживання енергії за 2018 р.

За прогнозними даними щодо виробництва електроенергії в Україні на періоди на 2025, 2030 та 2035 рр. можуть бути такі показники: 12, 13 та 13 млрд кВт·год.

Серед проблем розвитку малої гідроенергетики в Україні в окремі напрями можна виділити:

- відсутність оновленої і детальної інформації про гідроенергетичний потенціал малих річок України;
- відсутність державної координації у розміщенні малих ГЕС, стимулюванні процесу відродження малої

гідроенергетики і координації дій суб'єктів господарювання та інвесторів, неконкурентоспроможний на ринку електроенергії "зелений тариф";

- слабка виробнича та ремонтна база підприємств, які випускають гідротехнічне обладнання для малих ГЕС, необхідність розроблення державної програми серійного виготовлення вітчизняного обладнання для малих ГЕС;
- недосконалість нормативно-правової бази та практично повна відсутність нормативно-технічної бази,

системи нормування, стандартизації і технічного регулювання у сфері створення та експлуатації малих ГЕС;

- відсутність методик оцінки і прогнозування можливого впливу малих ГЕС на природне середовище та господарську діяльність тощо.

"Зелений" тариф на електричну енергію. Однією з важливих проблем відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) – це існування неконкурентоспроможного на ринку електроенергії "зеленого тарифу". Протягом останніх років Україна намагалася збільшити частку ВДЕ в енергетичному балансі в рамках сприяння ефективності та безпеці. Зокрема, Енергетична стратегія України передбачає зростання загального обсягу використання ВДЕ до 12 % до 2025 р. та до 25 % до 2035 р., у тому числі для виробництва електроенергії. У рамках

стимулювання розвитку сектору відновлюваної енергетики Україна запровадила систему "зелених" тарифів для закупівлі електроенергії, виробленої з ВДЕ, та її передачі загальними мережами. Тарифи відрізняються залежно від виробника та типу альтернативного джерела енергії. Їхній коефіцієнт запроваджується на рівні роздрібного тарифу для споживачів другого класу напруги на січень 2009 р., помноженого на коефіцієнт "зеленого" тарифу для електричної енергії, виробленої споживачами, у тому числі енергетичними кооперативами, з гідроенергії генеруючими установками, встановлена потужність яких не перевищує 150 кВт (табл. 2) (*Енергетична стратегія України ...*, 2013, 2017; *Концепція "зеленого" ...*, 2020).

Таблиця 2

Коефіцієнт "зеленого" тарифу для категорій об'єктів електроенергетики (*Концепція "зеленого" ...*, 2020)

Категорії об'єктів електроенергетики, для яких застосовується "зелений" тариф	Коефіцієнт "зеленого" тарифу для об'єктів або його черг/пускових комплексів, введених в експлуатацію			
	2013–2014 рр.	2015–2019 рр.	2020–2024 рр.	2025–2029 рр.
для електроенергії, виробленої мікрогідроелектростанціями	3,6	3,24	2,92	2,59
для електроенергії, виробленої мінігідроелектростанціями	2,88	2,59	2,33	2,07
для електроенергії, виробленої малими гідроелектростанціями	2,16	1,94	1,75	1,55

Для електроенергетичних установок, які виробляють електроенергію з альтернативних джерел енергії та використовують обладнання українського виробництва, передбачені надбавки до "зеленого" тарифу, аукціонної ціни. Законом передбачена надбавка в розмірі 5 % до "зелених" тарифів для виробників, які беруть участь в аукціоні, що використовують 30–50 % обладнання українського виробництва, і надбавка в розмірі 10 % за використання 50 % і більше обладнання українського виробництва (Закон України "Про альтернативні джерела енергії" (зі змінами та доповненнями від 22 травня 2019 року) (*Огляд енергетичного ...*, 2019).

Енергетична стратегія України. На жаль, ще й досі на загальнодержавному рівні відсутня оновлена і детальна інформація про гідроенергетичний потенціал малих річок України (*Гребінь та ін.*, 2013; *Закон України ...*, 2016), а також державна координація у розміщенні малих ГЕС. Проте позитивним є те, що триває робота з уточнення економічно доцільного гідроенергопотенціалу України, у тому числі на раніше споруджених водосховищах і на об'єктах утилізації енергетичних скидів технічних систем водозабезпечення та водовідведення. Згідно з "Енергетичною стратегією України на період до 2030 року" в галузі малої гідроенергетики передбачається здійснити:

- реконструкцію та відновлення МГЕС загальною потужністю 135 МВт;
- будівництво нових МГЕС на річці Тиса та її притоках загальною потужністю 400 МВт;
- будівництво нових МГЕС на річці Дністер і її притоках загальною потужністю 560 МВт;
- будівництво нових децентралізованих МГЕС на малих водотоках (загальна потужність – 45 МВт).

До 2030 р. передбачається довести генеруючу потужність всіх МГЕС України до 1140 МВт з річним обсягом виробництва електрики 3,75 млрд кВт·рік. Розвиток малої гідроенергетики сприятиме децентралізації загальної енергетичної системи, що зніме ряд проблем в енергопостачанні віддалених і важкодоступних сільських регіонів. Малі гідроелектростанції можуть стати суттєвою складовою енергозабезпечення регіонів України.

В енергетичній стратегії передбачається розроблення та затвердження Схеми комплексного використання водних і гідроенергетичних ресурсів річок України та уточнення невикористаного економічно ефективного гідроенергетичного потенціалу, а також вказано на необхідність оновлення регіональних програм розвитку малої гідроенергетики з урахуванням питань будівництва нових малих ГЕС у комплексі інфраструктури для захисту від повеней.

У стратегічних документах у контексті розвитку малої гідроенергетики визнано одним з необхідних заходів підготовку експертних висновків щодо визначення гідроенергетичного потенціалу та місць для встановлення об'єктів малої гідроенергетики (у рамках заходу з удосконалення організаційної структури водогосподарського комплексу для забезпечення протипаводкового захисту). Однак такі дослідження потенціалу розміщення ВДЕ (зокрема, малих ГЕС) не пов'язують з обов'язковим комплексним розглядом також на предмет доцільності з погляду екологічної безпеки.

Зростають перспективи використання відновлюваних джерел енергії (у тому числі енергії малих річок) в Україні і у зв'язку з ратифікацією "Протоколу про приєднання до Договору про створення Енергетичного Співтовариства" у 2010 р., оскільки у рамках цього документу Україна взяла на себе зобов'язання відповідати нормам Директиви 2001/80/ЄС зі зниження викидів забруднюючих речовин (пилу, оксидів сірки й азоту) великими паливосталювальними установками до 01.01.2018 р. (*Левіна*, 2018). За умови оптимального розвитку мала гідроенергетика України мала б можливість виробництва близько 6,4–6,8 млрд кВт·год електроенергії, що еквівалентно заміщенню органічного палива в обсязі 2,2–2,4 млн тонн (*Закон України ...*, 2019).

Варто зазначити, що у 2019 р. були видані "Науково-методичні рекомендації щодо підготовки звіту ОВД при будівництві малої ГЕС" (*Науково-методичні рекомендації ...*, 2019), що мають позитивно вплинути на розвиток галузі. Методичний посібник розроблено в обсязі екологічного блоку міжнародної системи оцінки Environmental and Social Impact Assessment (ESIA), яку застосовують

при наданні кредитів Групи світового банку (ЄБРР, МФК, СБ та ін.), у тому числі для фінансування будівництва гідроенергетичних об'єктів відповідно до "Екологічної і соціальної політики ЄБРР", з урахуванням Керівних принципів сталого розвитку гідроенергетики у басейні Дунаю, Директиви ЄС зі стимулювання використання енергії з відновлювальних джерел, Водної рамкової директиви ЄС та міжнародного досвіду, а також нормативних документів України та іншої офіційної інформації, з урахуванням останніх досягнень гідроенергетики. Посібник містить практичні рекомендації щодо підготовки звіту з ОВД залежно від типу гідроспоруд, регіону планової діяльності та потенційних ризиків, що можуть виникнути під час будівництва/реконструкції чи експлуатації малих гідроелектростанцій, а також настанови щодо необхідного збору матеріалів та розробки компенсаторних заходів. У ньому розглянуто основні ризики та типи ефектів, що можуть виникнути у процесі будівництва чи експлуатації малих гідроелектростанцій; запропоновано пояснення, яких негативних наслідків при цьому можна уникнути або принаймні звести їх до мінімуму за різних умов. Також висвітлюються такі актуальні та важливі для розвитку МГЕС питання: нормативно-правові акти щодо процедури оцінки впливу на довкілля в Україні; визначення встановленої потужності станції, визначення обсягу досліджень та рівня деталізації інформації; визначення факторів довкілля, які, ймовірно, зазнають впливу; опис можливого впливу на довкілля; сукупний вплив каскадів МГЕС; підбір та опис методів прогнозування наслідків впливів; розробка заходів, спрямованих на запобігання негативного впливу та пошуки компенсаторних механізмів; приклади компенсаторних заходів; демонтаж гідроспоруд у разі припинення діяльності чи виникнення аварійних ситуацій; розробка програми екологічного моніторингу та ін. Практичні рекомендації є саме тим інструментом, що дозволить будувати нові МГЕС з якомога вищою ефективністю як економічною, так і екологічною (*Науково-методичні рекомендації...*, 2019).

За підтримки громадської спілки "Всесвітній фонд природи. Україна" група науковців представила методику визначення особливо цінних ділянок річки з метою їхнього збереження та охорони, яка була використана як методологічна основа для Проекту Закону України "Про внесення змін до деяких законодавчих актів з метою збереження річок". Методика, розроблена відповідно до Водного кодексу України та Законів України "Про охорону навколишнього природного середовища", "Про екологічну мережу України", "Про природно-заповідний фонд України", з урахування вимог Директиви 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради "Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики" від 23 жовтня 2000 року (*Методика визначення...*, 2019), чітко і детально окреслює шляхи визначення та оцінки особливо цінних ділянок річки та може слугувати "дорожньою картою" для інвесторів при виборі ділянок під будівництво МГЕС. Методика дозволяє зберегти унікальні цінні ділянки річок або, навпаки, використовувати ділянки річок із 100-відсотковою впевненістю щодо їх придатності до забудови. Така детальна оцінка ділянок річок робить процес створення МГЕС більш "прозорим" та дає змогу суттєво підняти рівень довіри місцевої громади до інвестора.

Перспективи використання гідроенергетичного потенціалу річок України. З початку ХХ ст. в Україні були побудовані малі ГЕС на багатьох малих річках. На кінець 1940-х – першу половину 50-х років чисельність малих гідроелектростанцій в Україні становила понад 950 із загальною встановленою потужністю 300 МВт (у 70-ті –

понад 1500 МГЕС). Однак у зв'язку з розвитком централизованого електропостачання і тенденцією виробництва електроенергії на потужних ТЕС (ТЕЦ), ГЕС та АЕС, будівництво МГЕС в середині 60-х років минулого століття було майже повністю призупинено, а пізніше припинено зовсім. Більшість існуючих малих ГЕС були згодом демонтовані, сотні з них зруйновані.

Натомість гідроенергетика на МГЕС набула широкого розвитку у багатьох розвинутих країнах як Європи, так і світу – у Швейцарії відсоток виробництва електроенергії на малих ГЕС становить 8,3 %, в Іспанії – 2,8 %, у Швеції – майже 3 %, а в Австрії – 10 %. Ще більш вражаючих показників вдалося досягти Китаю, близько 18–20 % всієї електроенергії тут виробляють понад 80 тисяч МГЕС (*Лежнюк та ін.*, 2011).

В Україні відновлення малої гідроелектрогенерации розпочалося лише на початку нового тисячоліття. Цьому питанню може сприяти впровадження "зеленого тарифу". Рентабельність генерації і досить швидка окупність проєктів (близько 5–7 років) зацікавила приватного інвестора. Однак широкого розвитку малої гідроенергетики в нашій країні не відбулось у зв'язку з великим спротивом громадськості. Наприклад, так звана історія намірів будівництва малої ГЕС на Росі біля м. Біла Церква сягає десяти років (*Екологічна проблема № 1...*, 2016).

Виходячи з основних положень міжнародних стандартів (*WaterQuality...*, 2005), технічне використання загального (теоретичного) гідроенергетичного потенціалу не повинно виходити за межі екологічного гідроенергетичного потенціалу (допустимого за умовами збереження природного стану річок). За такого підходу річковий стік буде обґрунтовано допущеним до альтернативних джерел енергетики. Для гірських та малих за водністю рівнинних річок технічно можливе використання гідроенергетичного потенціалу не повинно перевищувати 20–40 % від загального (теоретичного) гідроенергетичного потенціалу, оскільки це погіршить гідробіологічні умови водного об'єкта загалом. У цьому контексті слід зауважити, що погіршення гідробіологічних умов для традиційних ГЕС пов'язане зі значним дискретним відбором річкового стоку (*Гідроенекологічна оцінка...*, 2015, 2016, 2017, 2020).

Технологічна парадигма розвитку малої гідроенергетики. Сучасні технології будівництва малих ГЕС є модернізованими варіантами конструктивних елементів (робочих органів), які обґрунтовані на старих традиційних методологічних підходах щодо використання гідроенергетичного потенціалу річок (*Онищук, Ободовський*, 10.07.2015, 27.10.2014, 10.02.2017, 10.04.2017, 11.12.2017, 26.11.2018, 26.12.2019, 10.01.2020; *Онищук та ін.*, 26.12.2017, 25.04.2018, 26.11.2018). Експлуатація таких ГЕС не може кардинально вирішити проблему розвитку гідроенергетики, оскільки потужності їх є незначними, а сумарний вплив на русловий режим надзвичайно суттєвий. Натомість розвиток великої гідроенергетики потребує значних матеріальних і фінансових затрат, які будуть окупатись протягом багатьох років з урахуванням реальних незворотних змін навколишнього середовища. Крім того, для їх будівництва вкрай мало зручних місць.

Переваги малої гідроенергетики за новими технологічними підходами щодо високоекоекологічного використання водних ресурсів (*Гідроенекологічна оцінка...*, 2015, 2016, 2017; *Онищук, Ободовський*, 10.07.2015, 27.10.2014, 10.02.2017, 10.04.2017, 11.12.2017, 26.11.2018, 26.12.2019, 10.01.2020; *Онищук та ін.*, 26.12.2017, 25.04.2018, 26.11.2018) можуть бути сформульовані таким чином:

- виробництво електроенергії без використання викопного органічного та ядерного палива;

- значний термін служби та висока надійність експлуатації;
- передбачуваність та забезпеченість режимів роботи станції при зміні напруги в мережі споживачів;
- висока маневреність і коефіцієнт готовності станції для підключення до єдиної енергетичної системи;
- можливість повної автоматизації процесу експлуатації;
- мінімальний вплив на навколишнє середовище при правильному виборі місця розташування ГЕС та дотримання екологічного законодавства;
- мінімальний вплив на ландшафт та незначне відчуження земельних ділянок;
- додаткові можливості для ведення рибного господарства, зрошення, водопостачання;
- експлуатація ГЕС за малих витрат води (у межах від 30 до 400 л/с) і її скидання поруч з водозабором практично не змінює режимів рівнів води в басейні, ставку, річці, озері, водосховищі.

Перспективним напрямом будівництва малих та середніх за потужністю ГЕС є використання електромагнітного поля на окремих елементах деривації (при збереженні сучасних традиційних за базовою конструкцією усіх інших об'єктів гідроенергетики). У цьому контексті задекларовані нові конструктивні елементи деривації ГЕС та їх раціональне комплексне розміщення на гірських і рівнинних річках (Онищук, Ободовський, 10.07.2015, 27.10.2014, 10.02.2017, 10.04.2017, 11.12.2017, 26.11.2018, 26.12.2019, 10.01.2020; Онищук та ін., 26.12.2017, 25.04.2018, 26.11.2018). Гідроелектростанції з новою конструкцією деривації були науково обґрунтовані і отримали назву – високоекологічні малі гідроелектростанції (ВЕМГЕС). В їх основі використано підходи до поліпшення конструктивних елементів деривації високоекологічної малої ГЕС, які змогли б успішно конкурувати з існуючими малими та середніми за потужністю ГЕС у безпечному екологічному режимі її експлуатації.

Висновки. Аналіз попередніх досліджень засвідчив доволі розгалужений їх спектр у галузі гідроенергетики та гідроенергетичного потенціалу річок України. Оцінка виробництва первинної енергії засвідчила доволі малу частку відновлювальної енергетики взагалі і малої гідроенергетики зокрема, особливо в її генерації, що не відповідає загальним світовим тенденціям. Розроблено нові підходи щодо оцінки гідроенергетичного потенціалу річок України та впровадження високоекологічних МГЕС у реальний енергетичний сектор, що є перспективним щодо вирішення гідроенергетичних питань на гірських і рівнинних річках України. Експлуатація високоекологічних малих ГЕС дозволить розв'язати цілий ряд інших проблем, а саме: підвищити якість річкової води, поліпшити гідробіологічний стан водних об'єктів; отримати дешеву за собівартістю електроенергію та відкрити нові робочі місця.

Список використаних джерел

- Архипова, Л.М. (2011). Природно-техногенна безпека гідроенергостис-тем. Монографія. ІФ: ІФНТУНГ, 366.
- Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. (2020). Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 82 с.
- Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України. (н.д.). Отримано 15.08.2018 з: <http://live.org.ua/atlas.html>
- Білецький, П. (2014). Малі ГЕС: енергонебезпечність чи надумана небезпека? *Новини Закарпаття*, 66–67, (4237–4238), 8.
- Васко, П.Ф., Бриль, А.О., Мороз, А.В. (2012). Визначення гідроенергетичного потенціалу малих річок за довірливої забезпеченості витрат води. *Відновлювана енергетика*, 1, 42–49.
- Віхорев, Ю.О., Соловйов, П.Б. (2013). Вирішення проблем розвитку малої гідроенергетики України потребує загальнодержавної координації. *Відновлювана енергетика*, 1(32), 69–75.

Гідроенергетична оцінка енергетичного потенціалу річок басейну Дніпра (в межах України) в умовах змін клімату. (2016). *Звіт про НДР (проміжний) № 16БП050-01*. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. № ДР 0116U004827.К., 192 с.

Гідроенергетична оцінка енергетичного потенціалу річок басейну Дніпра (в межах України) в умовах змін клімату. (2017). *Звіт про НДР (заключний) № 16БП050-01*. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. № ДР 0116U004827.К., 291 с.

Гідроенергетична оцінка та прогноз гідроенергетичного потенціалу річок України в умовах кліматичних змін. (2020). *Звіт про НДР (остаточний) № 18БП050-01*. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. № ДР 0118U001098.К., 687 с.

Гідроенергетична оцінка та прогноз енергетичного потенціалу річок Українських Карпат. (2015). *Звіт про НДР (заключний) № 14БП050-01*. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. № ДР 0114U003482.К., 336 с.

Голованов, І.М. (2007). Оцінка інвестиційної привабливості проєктів спорудження та реконструкції малих ГЕС. *Матер. VIII міжнарод. конф. "Відновлювана енергетика XXI століття"*, АР Крим, Миколаївка, 17–21 вер. 2007, 200–201.

Голованов, І.М. (2012). Особливості використання гідронасосів у турбінному режимі для об'єктів малої гідроенергетики. *Відновлювана енергетика*, 2, 58–64.

Гребін, В.В., Яцюк, М.В., Чунарьов, О.В. (2013). Гідрографічне районування території України: принципи, критерії, порядок здійснення. *Гідрологія, гідрохімія і гідроенергетика*, 1, 6–16.

Екологічна проблема № 1: масове будівництво ГЕС на річках України. (2016). <http://pryroda.in.ua/miniges/mala-hes-na-richtsi-ros/>

Енергетика: історія, сучасність і майбутнє 2012–2013. (н.д.). Отримано 11.10.2019 з: <http://energetika.in.ua/ua/about-books>

Енергетична стратегія України на період до 2030 року. (2013). Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013 р. Отримано 11.10.2020 з: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#n3>

Енергетична стратегія України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність". (2017). Схвалена розпорядженням Уряду від 18 серпня 2017 р. № 605-р. Отримано 11.10.2020 з: <http://195.78.68.67/minugol/doccatalog/document?id=245234103>

Закон України "Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії". (2019). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2712-19>

Закон України "Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо впровадження інтегрованих підходів в управлінні водними ресурсами за басейновим принципом". (2016). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/en/1641-19>

Касян, В.П., Лебедь, А.Г. (2011). Оптимизация работы модели водяной турбины типа ротора Дарье с активным управлением лопастями. *Відновлювана енергетика*, 4, 42–48.

Концепція "зеленого" енергетичного переходу України до 2050 року. (2020). Отримано 21.01.2020 з: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?sessionId=12D73B364595AE9BC3059133CE27EA7A.app1?art_id=245434883&cat_id=35109

Левіна, Г. (2018). Мала гідроенергетика України. Стислий огляд законодавства України щодо основних засад розвитку малої гідроенергетики. І частина, 46 с.

Методика визначення особливо цінних ділянок річки з метою їхнього збереження та охорони. (2019). WWF України, 20 с.

Науково-методичні рекомендації щодо підготовки звіту ОВД при будівництві малої ГЕС. (2019). Методичний посібник. За ред. С.О. Афанасьєва. Київ, 94 с.

Ободовський, О., Данько, К., Почаєвець, О. (2017). Загальний гідроенергетичний потенціал річок Українських Карпат. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія*, 1 (66), 15–28. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2017.66.2>

Ободовський, О., Данько, К., Почаєвець, О., Ободовський, Ю. (2016). Методика встановлення гідроенергетичного потенціалу річок (на прикладі річок Українських Карпат). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія*, 1 (64), 5–12. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2016.64.1>

Обухов, Є.В. (1999). Використання відновлювальних джерел енергії. Навч. посібник. Одеса: ТЕС, 254 с.

Огляд енергетичного сектору України. Інституції, управління та політичні засади OECD. (2019). 78 с.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г. (10.01.2020). Високоекологічна гідроелектростанція з шестифазними генераторами. *Патент України на корисну модель № 139617*. Опубл. *Бюл.*, № 1, 2020.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г. (10.01.2020). Генератор шестифазного перемінного електричного струму. *Патент України на корисну модель № 139618*. Опубл. *Бюл.*, № 1, 2020.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г. (10.02.2017). Універсальна високоекологічна мала гідроелектростанція (УВМГЕС). *Патент України на корисну модель № 113587*. Опубл. *Бюл.*, № 3, 2017.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г. (10.04.2017). Універсальний гідравлічний сифон. *Патент України на корисну модель № 115332*. Опубл. *Бюл.*, № 7, 2017.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г. (10.07.2015). Спосіб розміщення високоекологічної малої ГЕС. *Патент України на корисну модель № 100050*. Опубл. *Бюл.*, № 13, 2015.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г. (11.12.2017). Високоекологічна гідроелектростанція. *Патент України на корисну модель №121730*. Опубл. *Бюл.*, № 23, 2017.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г. (26.11.2018). Модернізована високо-екологічна гідроелектростанція. *Патент України на корисну модель № 130189*. Опубл. *Бюл.*, № 22, 2018.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г. (26.12.2019). Високотужна високо-екологічна гідроелектростанція. *Патент України на корисну модель № 139302*. Опубл. *Бюл.*, № 24, 2019.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г. (27.10.2014). Високоекологічна мала ГЕС. *Патент України на корисну модель №93887*. Опубл. *Бюл.*, № 20, 2014.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г., Почаєвцев, О.О. (26.11.2018). Спосіб регулювання мінімального стоку гірських річок. *Патент України на корисну модель № 130190*. Опубл. *Бюл.*, № 22, 2018.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г., Хабель, М. (25.04.2018). Високоекологічна гідроелектростанція. *Патент України на корисну модель №124817*. Опубл. *Бюл.*, № 8, 2018.

Онищук, В.В., Ободовський, О.Г., Хабель, М. (26.12.2017). Універсальна високо-екологічна гідроелектростанція. *Патент України на корисну модель №121863*. Опубл. *Бюл.*, № 24, 2017.

Паливно-енергетичні ресурси України. (2018). Статистичний збірник. Державна служба статистики України. Київ, 194 с.

План відновлення України. (2022) Отримано 22.10.2022 з: <https://ua.urc2022.com/plan-vidnovlennya-ukrayini>

Рябенко, О.А., Лутаєв, В.В. (2012). Сучасні тенденції в будівництві малих ГЕС в Україні. *Гідроенергетика України*, 2, 45–49.

Хоменко, В.О., Лежнюк, П.Д. (2012). Аналіз стану та перспективи розвитку малої гідроенергетики в Україні. Експлуатація малих ГЕС та каскадів малих ГЕС в сучасних умовах. *Вісник Вінницького політех. ін-ту*, 6, 118–123.

Цепенда, М.М. (2009). Методичні особливості економіко-географічної оцінки гідроенергетичного потенціалу Середнього Придністров'я. *Наук. записки Вінницького держ. ун-ту ім. М. Коцюбинського. Географія*, 18, 211–219.

Яцик, А.В., Яцик, В.А., Басюк, Т.О. (2011). Управління розвитком та ефективністю використання малої гідроенергетики в Україні. *Гідроенергетика України*, 3-4, 7–10.

Hydropower Potential Assessment: mountain rivers of Ukrainian Carpathians. (2021). O.Obodovskiy (Ed.). LAP Lambert Akademik Publishing, 122 p.

Obodovskiy, O.G., Danko, K.Yu., Pochayevets, O.O., Onyshchuk, V.V., Snizhko, S.I., Lukyanets, O.I. (2020). Methodic Aspects of Hydroecological Assessment of Hydropower Potential of the Plain Rivers' (by Example of Dnieper Right-Bank Rivers). *Hydrobiological Journal*, 56, 4, 84–102. DOI: 10.1615/HydrobJ.v56.i4.70

Water Quality. (2005). EN14614:2004. Guidance Standard for assessing the hydromorphological features of rivers. Brussels: CEN, European Committee for Standardization, 24 p.

Survey of Energy Resources. (2007). Hydropower. London: World Energy Council, 600 p.

References

Atlas of Energy Potential of Renewable and Non-Traditional Energy Sources of Ukraine. (n.d.). Retrieved 15.08.2018 from: <http://live.org.ua/atlas.html> [in Ukrainian]

Atlas of Energy Potential of Renewable Energy Sources of Ukraine. (2020). Kyiv: Institute for Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 82. [in Ukrainian]

Biletsky, P. (2014). Small hydropower plants: energy dependence or a contrived threat? *Novyny Zakarpattya*, 66–67, (4237–4238), 8. [in Russian]

Cependa, M.M. (2009). Methodological Peculiarities of Economic and Geographic Assessment of Hydroenergetic Potential of the Middle Dniester Region. *Notes of the Vinnytsia State Pedagogical University named after M. Kotsyubynskiy. Geography*, 18, 211–219. [in Ukrainian]

Concept of Green Energy Transition of Ukraine until 2050. (2020). http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?jsessionid=12D73B364595AE9BC3059133CE27EA7A.app1?art_id=245434883&cat_id=35109 [in Ukrainian]

Energy strategy of Ukraine for the period up to 2030. (2013). Captured by the Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 1071 of 24.07.2013. Retrieved 11.10.2020 from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#n3> [in Ukrainian]

Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Safety, energy efficiency, competitiveness". (2017). Approved by the Order of the Government of Ukraine of 18 September 2017 № 605-r. Retrieved 11.10.2020 from: <http://195.78.68.67/minugol/doccatalog/document?id=245234103> [in Ukrainian]

Energy: History, Modernity and the Future 2012–2013. (n.d.). Retrieved 11.10.2019 from: <http://energetika.in.ua/ua/about-books> [in Ukrainian]

Environmental Problem No. 1: Massive construction of hydropower plants on rivers of Ukraine (2016). <http://pryroda.in.ua/miniges/mala-hes-na-richtsiros/>. [in Ukrainian]

Golovanov, I.M. (2007). Estimation of Investment Privatization of Projects of Construction and Reconstruction of Small Hydroelectric Power Plants. *VIII International Conference "Renovated Energy of the XXI Century", Autonomous Republic of Crimea, Mykolayivka, May 17-21 2007*, 200-201. [in Ukrainian]

Golovanov, I.M. (2012). Peculiarities of Use of Hydropumps in Turbine Mode for Small Hydropower Objects. *Renewable Energy*, 2, 58-64. [in Ukrainian]

Grebin, V.V., Yatsyuk, M.V., Chunariov, O.B. (2013). Hydrographic zoning of the territory of Ukraine: principles, criteria, order of implementation. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 1, 6-16. [in Ukrainian]

Hydrological and ecological assessment and forecast of hydropower potential of Ukrainian rivers under conditions of climatic changes. (2020). *Report on the results of the Scientific and Practical Work (Residual) No. 185П050-01*. Kyiv National Taras Shevchenko University. NO. DR 0118U001098. K., 687 p. [in Ukrainian]

Hydrological and ecological assessment of energy potential of the Dniro basin rivers (within Ukraine) under conditions of climate changes. (2016). *Report on the Scientific-Development Report (Extensive) No. 16BP050-01*. Kyiv National Taras Shevchenko University. NO. DR 0116U004827. K., 192 p. [in Ukrainian]

Hydrological and ecological assessment of energy potential of the Dniro basin rivers (within Ukraine) under conditions of climatic changes. (2017). *Report on the DNR (conclusion) No. 16BP050-01*. Kyiv National Taras Shevchenko University. NO. DR 0116U004827. K., 291 p. [in Ukrainian]

Hydrological assessment and forecast of the energy potential of the rivers of the Ukrainian Carpathian Mountains. (2015). *Report on the Scientific and Practical Report (final) No. 14BP050-01*. Kyiv National Taras Shevchenko University. NO. DR 0114U003482. K., 336 p. [in Ukrainian]

Hydropower Potential Assessment: mountain rivers of Ukrainian Carpathians (2021). O. Obodovskiy (Ed.). LAP Lambert Akademik Publishing, 122 p.

Kasyan, V.P., Lebed, A.G. (2011). Optimization of a water turbine model of the Daprier-type rotor with active blade control. *Vidnovluyana Energetika*, 4, 42-48. [in Russian]

Khomenko, V.O., Lezhnyuk, P.D. (2012). Analyses of the state and prospects for the development of small hydroenergy in Ukraine. Exploitation of small hydro power plants and cascades of small hydro power plants in modern conditions. *Journal of the Vinnytsa Polytechnic Institute*, 6, 118-123. [in Ukrainian]

Law of Ukraine "On Amendments to Certain Laws of Ukraine on Ensuring Competitive Conditions for Electricity Production from Alternative Energy Sources". (2019). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2712-19> [in Ukrainian]

Law of Ukraine "On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine on Implementation of Integrated Approaches in Water Resources Management by Basin Principle". (2016). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/en/1641-19>. [in Ukrainian]

Levina, G. (2018). Small hydroenergetics of Ukraine. Stylish review of the legislation of Ukraine on the basic preconditions for the development of small hydroenergetics. Part I, 46. [in Ukrainian]

Methodology for identifying especially valuable river areas for their conservation and preservation. (2019). WWF Ukraine. 20 p. [in Ukrainian]

Obodovskiy, O., Danko, K., Pochayevets, O., Obodovskiy, U. (2016). Methodology of establishing hydroenergetic potential of rivers (on the application of rivers of the Ukrainian Carpathians). *Bulletin of Kyiv National Taras Shevchenko University. Geography*, 1 (64), 5–12. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2016.64.1> [in Ukrainian]

Obodovskiy, O.G., Danko, K.Yu., Pochayevets, O.O., Onyshchuk, V.V., Snizhko, S.I., Lukyanets, O.I. (2020). Methodic Aspects of Hydroecological Assessment of Hydropower Potential of the Plain Rivers' (by Example of Dnieper Right-Bank Rivers). *Hydrobiological Journal*, 56, 4, 84–102. DOI: 10.1615/HydrobJ.v56.i4.70

Obodovskiy, O., Danko, K., Pochayevets, O. (2017). Overall hydroenergetic potential of rivers of the Ukrainian Carpathians. *Bulletin of Kyiv National Taras Shevchenko University. Geography*, 1 (66), 15–28. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2017.66.2> [in Ukrainian]

Obukhov, Y.V. (1999). Utilization of renewable energy sources. Odessa: TEC, 254 p. [in Ukrainian]

Onyshchuk V.V., Obodovskiy, O.G. (10.01.2020). Six-phase alternating electric current generator. *Ukrainian patent for utility model No. 139618*. Publ. *Bulletin*, no. 1, 2020. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G. (10.01.2020). Highly efficient hydroelectric power plant with six-phase generators. *Ukrainian patent for utility model No. 139617*. Published *Bulletin*, No. 1, 2020. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G. (10.02.2017). Universal high-efficiency small hydroelectric power plant (UVMHES). *Ukrainian patent for utility model No. 113587*. Published by *Bulletin*, No. 3, 2017. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G. (10.04.2017). Universal hydraulic siphon. *Ukrainian patent for utility model No. 115332*. Published by *Bulletin*, No. 7, 2017. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G. (10.07.2015). Method of placement of high-level small hydroelectric power station. *Patent of Ukraine for the utility model No. 100050*. Published *Bulletin*, No. 13, 2015. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G. (11.12.2017). Highly efficient hydroelectric power plant. *Ukrainian patent for utility model No. 121730*. Republished *Bulletin*, No. 23, 2017. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G. (26.11.2018). Modernized high-efficiency hydroelectric power plant. *Ukrainian patent for utility model No. 130189*. Published *Bulletin*, No. 22, 2018. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G. (26.12.2019). Highly efficient high-voltage hydroelectric power plant. *Patent of Ukraine for the utility model No. 139302*. Published *Bulletin*, No. 24, 2019. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G. (27.10.2014). Highly efficient GES machine. *Patent of Ukraine for the utility model No. 93887*. Published by *Bulletin*, No. 20, 2014. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G., Habel, M. (26.12.2017). Highly efficient hydroelectric power plant. *Ukrainian patent for utility model No. 124817*. Published by *Bulletin*, No.8, 2018. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G., Habel, M. (26.12.2017). Universal high-capacity hydroelectric power plant. *Ukrainian patent for utility model No. 121863*. Published by *Bulletin*, No. 24, 2017. [in Ukrainian]

Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.G., Pochayevets, O.O. (26.11.2018). Method of regulation of the minimum flow of mountain rivers. *Ukrainian patent for utility model No. 130190*. Published by *Bulletin*, No. 22, 2018. [in Ukrainian]

Ptashkina-Girina, O.S., Saplin, L.A. (2000). Evaluation of energy resources of small rivers. *Technique in agriculture*, 6, 14–16. [in Ukrainian]

Review of the energy sector of Ukraine Institutions, Management and Political Grounds OECD. (2019). 78 p. [in Ukrainian]

Ryabenko, O.A., Lutayev, V.B. (2012). Modern tendencies in the construction of small hydropower plants in Ukraine. *Hydroenergetics of Ukraine*, 2, 45–49. [in Ukrainian]

Scientific and methodological recommendations on the preparation of a report of the Department of Internal Affairs during the construction of a small

hydropower plant. (2019). Methodological guidebook. Edited by S.O. Afanasiev. Kiev, 94 p. [in Ukrainian]

Survey of Energy Resources. (2007). Hydropower. London: World Energy Council, 600 p.

The coal-energy resources of Ukraine. (2018). Statistical collection. The State Statistics Service of Ukraine. Kyiv, 194 p. [in Ukrainian]

Vasko, P.F., Bril, A.O., Moroz, A.V. (2012). Determination of hydropower potential of small rivers for water consumption. *Renewable energy*, 1, 42–49. [in Ukrainian]

Vikhorev, Y.O., Solovyov, P.B. (2013). The implementation of problems of small hydroenergetics development in Ukraine requires a nationwide coordination. *Renewed Energy*, 1(32), 69–75. [in Ukrainian]

Water Quality. (2005). EN14614:2004. Guidance Standard for assessing the hydromorphological features of rivers. Brussels: CEN, European Committee for Standardization, 24 p.

Yatsik, A.V., Yatsik, V.A., Basyuk, T.O. (2011). Management of Development and Efficiency of Small Hydroenergy in Ukraine. *Hydroenergetics of Ukraine*, 3–4, 7–10. [in Ukrainian]

Arkipova, L.M. (2011). Natural-technogenic bezpeka gidroekosti: monografia. IFNTUNG, 366. [in Russian]

Надійшла до редколегії 12.08.22

O. Obodovskiy, Dr. Sci. (Geogr.), Prof.,
E-mail: obodovskiy@univ.kiev.ua;
O. Kryvets, PhD (Geogr.),
E-mail: like_mila@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography Department,
2 Glushkov Ave., Kyiv, Ukraine

ANALYTICAL REVIEW AND PROSPECTS OF RESEARCH IN THE FIELD OF SMALL HYDROENERGETICS AND HYDROENERGETIC POTENTIAL OF UKRAINIAN RIVERS

The main directions and analysis of research in the field of hydropower and hydropower potential of Ukrainian rivers are established. A brief review of the classification of small hydropower plants is given. Estimates of hydropower potential of rivers are considered. The ecological aspects of the use of hydropower potential of rivers are highlighted. Tendencies of development of Ukrainian power engineering and, in particular, hydropower are analyzed. The role of "green" tariff for electric energy produced by small hydropower is shown. The role of "Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2030" in the field of small hydropower is highlighted. The methodical approaches to environmental impact assessment in the construction of small hydropower plants are characterized. The prospects for using the hydropower potential of Ukrainian rivers and a proposed new technological paradigm for the development of small hydropower in Ukraine was assessed.

Keywords: *methodological approaches to formation of small hydroenergetics, assessment of hydroenergetic potential of Ukrainian rivers, ecological aspects of hydroenergetic potential of rivers, small hydro energy resources and their types, High-tech small hydroelectric power plants and their efficiency.*

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

UDC 550.8.6221

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.15>

S. Vyzhva¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhvas@gmail.com;
V. Zatserkovnyi¹, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com;
I. Zobniv¹, Student,
E-mail: ivannazobniv333@gmail.com;
M. De Donatis², Associate Prof.,
E-mail: mauro.dedonatis@uniurb.it;
I. Tsiupa¹, PhD (Geol.),
E-mail: tsiupa@ukr.net;

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

²Department of Theoretical and Applied Sciences,
University of Urbino "Carlo Bo", Urbino, 61029, Italy

APPLICATION OF GEO-INFORMATION TECHNOLOGIES IN DETERMINING THE DEPTH OF EARTHQUAKE IN THE MONTE NERONE DISTRICT (MARCHE DISTRICT, NORTHERN APENNINES IN 1781)

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

In the work, the main fault of the Monte Nerone anticline (Marche – Northern Apennines) was investigated, as well as the study, identification and fixation of faults: the normal fault system in the Monte Nerone area and the search for correlations on the ground of the Monte Nerone fault with the earthquake in the Marche Apennines in 1781. A small-angle eastern normal fault dipping at a small angle in the structure of extensive deformations was interpreted, it was based on the seismic profiles of the crust. Therefore, seismic events registered in this tectonically active zone can be related to this fault, as, for example, recent events in the area of the southern Umbrian-Marchean Apennines. The main local tectonic structure is an anticlinorium, oriented in NW-SW, corresponding to the regional Apennine depression, with a longitudinal extension of about 30 km and a wavelength of 5–6 km.

The work on sounding the Monte Nerone main fault was developed in several stages: project preparation, terrain surveying, data processing and synthesis. The project included a CTR of the Marche region, a geodetic reference map based on the international ellipsoid centered on Monte Mario (Rome 1940), a geological map at a scale of 1:10 000 and satellite orthophoto plans of the reference areas. Reference layers were created in the work in the form of a shape file to be able to catalog and share the information obtained in the field. These layers included: metadata, data containing measurements, annotation. During the fieldwork, a route and stops were planned where more detailed measurements were made and played the role of landmarks for checking with previously obtained data to confirm or refute the hypothesis. In the route, nine main stops were selected, where reconnaissance of the territory was carried out, geological characteristics of the formation were determined, measurements and recording of the main fault, its direction, angles of dip and extension, slope were carried out. All measurements were recorded in the software environment and previously created database. Using a Bluetooth GPS connected to a tablet PC, accurate tracking of the position where the measurements were made was obtained.

With the help of the measurements carried out, it was possible to put forward the hypothesis that the Monte Nero fault extends from the west, starting from La Valle, crossing the western, southern and eastern slopes of Monte Nerone and extending to Monte La Montagnola, continuing to Pietralunga on its entire along the length of about 9.9 km. In addition, having the CTR with the geological map, we were able to confirm certain geological deposits. A 3D terrain model was created in ArcScene software to fully account for the terrain situation. The topography of the area was modeled in relation to the geological situation, the fault was marked, and the collected data were interpreted. Given the 54° dip, 90° inclination of the rocks we measured along the route, it can be assumed that the earthquake was shallow, with a maximum depth of about 10 km.

Keywords: GIS, GPS, CTR, structure-from-motion, 3D modelling, historical earthquake, instrumental seismicity, extensional tectonics.

Introduction. An important factor for determining the characteristics of seismic tectonically active areas is the mapping of faults and soil deformation. For this, geologists and geophysicists use digital tools to minimize the time of field research, reduce measurement errors to a minimum, and increase the accuracy of data acquisition and observations.

In the research carried out by the authors, the territory that experienced a strong earthquake on June 3, 1781 (6.5 MW) was selected. The earthquake significantly affected the northern sector of the Umbria-Marche Apennines. The catastrophe caused by this event was reported in many archival documents of the time. However, very little is known about the tectonic and structural features associated with this event (Colacicchi et al., 1970; Castellarin et al., 1982).

Since a large number of people live in the mentioned territory, and the event that occurred may be repeated in the future, it is extremely important to find clear evidence of the unequivocal connection of the faults coming to the surface with the earthquake.

The purpose of the work was to map the main fault of the Monte Nerone anticline (Marche – Northern Apennines),

conduct research, identify and fix the characteristics of possible faults: the normal fault system in the Monte Nerone area and search for correlations on the ground of the Monte Nerone fault with the earthquake that occurred on Apennines in the Marche area in 1781. The fault crosses the Monte Nerone (PU) ridge, continues westward north of Serravalle di Cardo, and extends in a southeast direction to Mount La Montagnola (Centamore et al., 1971, 1975).

The territory of the study. The Marche region is located in the center of the country, on the coast of the Adriatic Sea, divided into the provinces of Ancona, Ascoli Piceno, Macerata and Pesaro-e-Urbino (Fig. 1).

Monte Nerone is a mountain in the Marche region, belonging to the Umbria-Marche Apennine range, located in the municipalities of Apecchio, Cagliari and Piobbico, in the provinces of Pesaro and Urbino, reaching a height of 1.525 m above sea level with a height difference of 1.200 m from the valley floor. It is located to the north of the Monte Catria group, which gives its name to the Catria and Nerone mountain range (Fig. 2).



Fig. 1. The image of the researched area, on the Google map server.

Region of Marche, the capital of Pesaro and Urbino province

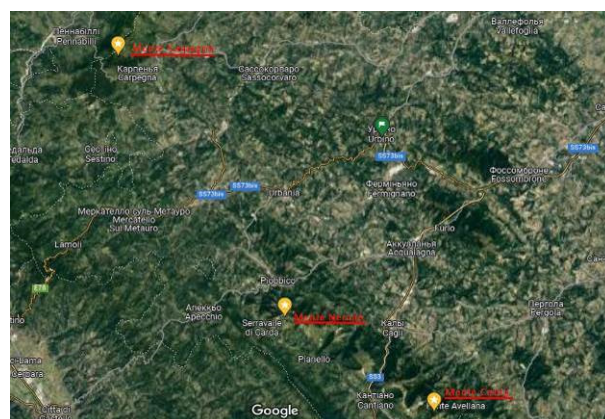


Fig. 2. Image of three mountains belonging to Umbria-Marche Apennine range in the researched area

This is a limestone massif, with a significant variety of landscapes; sinkholes, gorges, vertical walls and magnificent karst formations, both underground and surface. On its slopes there are limestone layered rocks of marine origin, belonging to the Jurassic period.

Tectonic structure. The extreme part of the northern Apennines, the Umbrian-Marchean Apennines, is a fold-thrust orogenic chain formed by the rotation of the Sardinian-Corsican block towards the Adriatic coast (Tozer *et al.*, 2002). Deformations migrated from the western to the eastern direction, from the inner side of the Tyrrhenian Sea

to the outer side of the Adriatic from the Oligocene to the Pliocene-Quaternary age, involving carbonate successions and syntectonic terrigenous deposits in the orogen (Lavecchia *et al.*, 1988; Pauselli *et al.*, 2006). The formation of the orogenic chain was then accompanied by progressive tectonic stretching, always in the same direction from northeast to southwest (Malinverno and Ryan, 1986).

The shortening structures are cut by successive normal faults in the Tyrrhenian-Tosco-Umbrian region (Fig. 3), while a compressional regime persists beyond the Apennine watershed, towards the Adriatic (De Donatis *et al.*, 2021).

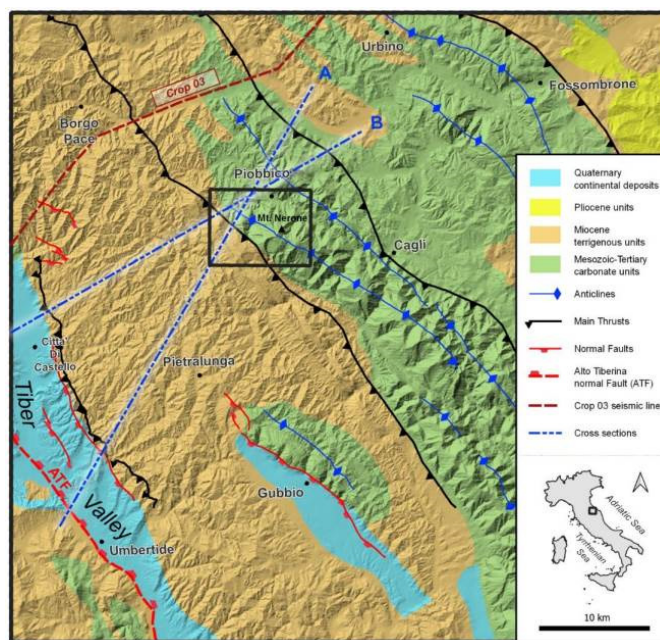


Fig. 3. Map-scheme of the northern sector of the Umbrian-Marchan Apennines (northern Apennines) on which the researched area and faults traces are shown by black rectangle

However, this hypothesis is questioned by various authors who believe that the extensional regime is no longer limited to the Tyrrhenian sector, but that even to the east, beyond the Apennine watershed, there are signs of a recent extensive expansion of tectonics (Chiaraluce *et al.*, 2017). A low-angle east normal fault (LANF) dipping at a low angle was interpreted in the structure of extensional deformations based on crustal seismic profiles (Mirabella *et al.*, 2011).

Therefore, seismic events recorded in this tectonically active zone (Mantovani *et al.*, 2014) may be related to this

fault, as, for example, recent events in region of the southern Umbrian-Marchean Apennines (Carannante *et al.*, 2013).

Geological features of the studied area. The study area is the interior sector of the Umbrian Marchese Apennines (province of Pesaro-Urbino, northern Marche), which includes the northwestern edge of the Monte Nerone anticline and the adjacent areas of the valley of the Biscubio River and its tributaries. The stratigraphy can be summarized as a carbonate sequence of Lower Jurassic to Oligocene age. This succession was deposited in a basin on the margin of the

African Platform during the transition from Liassic rifting to drift and developed on the margin. In the upper section, the content of terrigenous finely dispersed sediments increases in the sequence. The rock formation indicate the transition to the turbidite complex of the Miocene substage, represented in this region by the Marnoso-Arena Formation (*Butler et al., 2000*). The main local tectonic structure is an anticlinorium, oriented in NW-SW, corresponding to the regional Apennine depression, with a longitudinal extension of about 30 km and

a wavelength of 5–6 km. In the studied area, this structure has a periclinal termination overlain by the latest terrigenous formations due to out-of-sequence thrusts (*Menichetti et al., 1991*). In addition, the anticlinorium is dissected by numerous NW-SW trending faults, these faults dissect the entire structure. Recent and insignificant normal faults, with a length of several kilometers and extending NW-W, dissect the structure without obvious signs of connection with larger faults (Fig. 4).

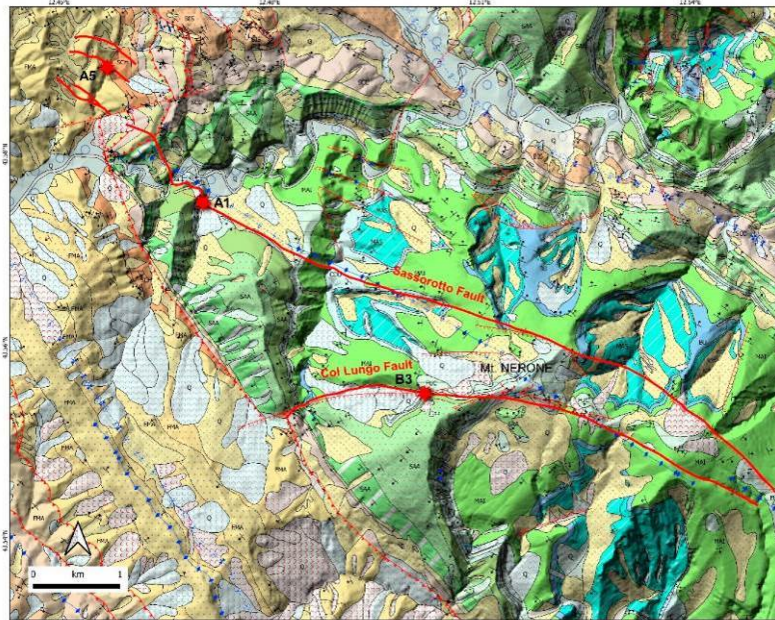


Fig. 4. Simplified geological map of the researched area of region Marche, scale 1 : 10 000. Fault traces mapped in this research are indicated by thick red lines

Research methods. The research of the Monte Nerone main fault was developed in several stages:

- I – project preparation;
- II – shooting of the area;
- III – Data processing and synthesis.

Chamber (laboratory) and field work alternated from beginning to end. At the beginning, preparatory work was carried out in the laboratory. During a survey, field data can be used to interpret and test new hypotheses. The project structure may also be modified to improve data collection and observations, both for ground and aerial surveys. During the period of work, it was necessary to alternate laboratory and field work. The final laboratory stage involved the final interpretation and synthesis of two- and three-dimensional maps, sections, and models.

The algorithm of the workflow with the phases of the survey and mapping processes is presented in Fig. 5.

Project preparation. The first procedure was to develop a project using QGIS software, which allowed the work file to be customized as needed. The project included a CTR of the Marche region, a geodetic reference map based on the international ellipsoid centered on Monte Mario (Roma 1940), a geological map at a scale of 1:10 000 and satellite orthophoto plans of the reference areas.

In the next step, reference layers were created in the form of a shape file to be able to catalog and separate the information, layer by layer:

- 1. deposits (dedicated to measurement and registration of exposure layers);

- 2. exposure (faults, layering).

Different fields were created for each layer, where you can define the type of information, data, measurement by setting three main fields:

- 1. metadata (identifiers, detectors, who performed the measurement, location and date of measurement);
- 2. measurement data;
- 3. annotations (places to insert notes for comments or attachments such as photos or log files).

Finally, for each layer, a type and the corresponding symbology of the type of information to be recorded are defined.

An illustration of the created map of Mount Mote Nerone: at the top of the CTR, in the center of the overlap of the CTR and the orthophoto, at the bottom of the overlap of the CTR with the geological map is presented in fig. 6.

In Fig. 7. the main layers, their types and symbols are presented on the left; on the right is an example of data collection for deposits.

Data processing. Data and measurements were collected using traditional instrumentation followed by analysis and cataloging digitally, noting directly in the QGIS project the position, orientation and type of added information.

By having a digital format of the completed work, you can comment and share with other researchers the information and assessments carried out on site.

In Fig. 8 illustrated the stops made during the route, where measurements were taken and data were collected.

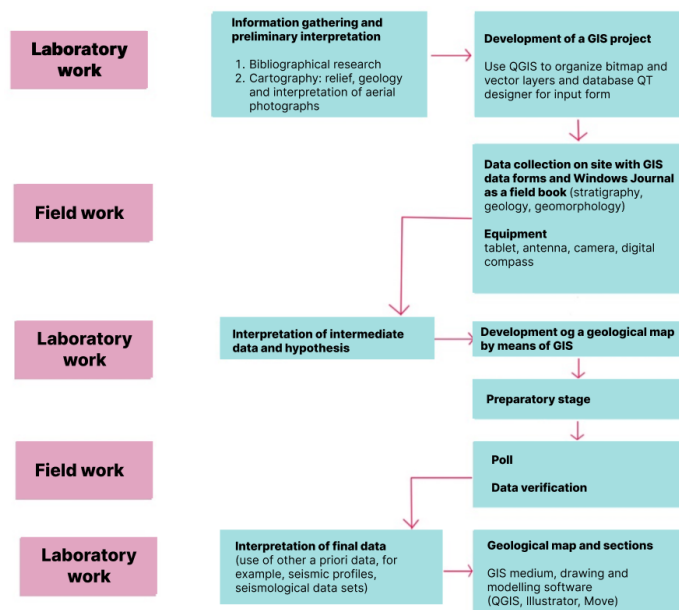


Fig. 5. Workflow algorithm with phases with phases of survey and mapping process

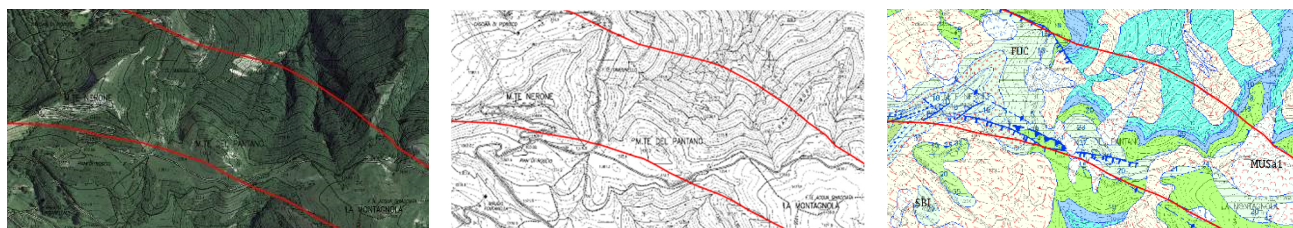


Fig. 6. Illustration of map which relates to Mote Nerone: at top – CTR, in the center of CRR and geological map overlap

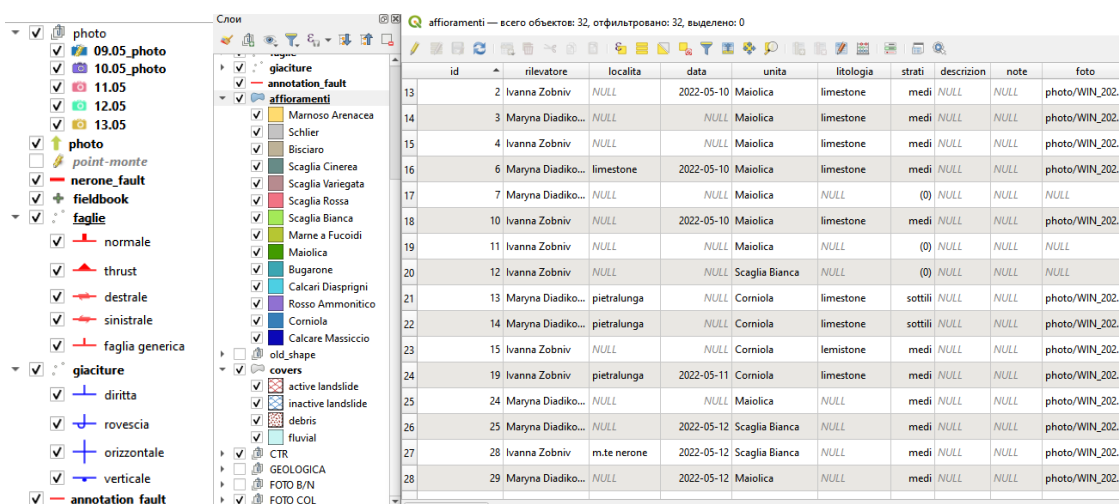


Fig. 7. Illustration of main layers on the left, their types and symbols; on the right there is an example of data collection for deposits



Fig. 8. Illustration of stops made along the route where measurements were taken and data collected

Stop No. 1: Several formations such as Scaglia Cinerea, usually marly gray or gray-green marly limestones, are exposed in this area on the southern slope. Unfortunately, it was not possible to carry out the measurement. Scaglia Variegata, represented by marly limestones and calcareous marls with a steepness of 223° and a slope of 76°, was found on the northeastern slope (Fig. 9).

Stop No. 2: The site is represented by well-stratified deposits of Maiolica – white micritic limestones with gray-black flint of medium thickness of 90°. Since it bordered an old, unused quarry, where vegetation prevented the view of the exposed area, it was not possible to carry out detailed measurements.

Stop No. 3: The site is also represented by Maiolica deposits. North direction 5°. Two measurements of the occurrence of rocks were made. Type – direct lying, dip 184°, slope 45°. The second type is straight, 180° fall, 87° slope. The southern side of the main fault was recorded, dip 190°, slope 59° (Fig. 10).

Stop No. 4: The observation site is located in the Monte Nerone chain, the outcrop represents the geological characteristic of the Maiolica formation; direction 180°, measurements of the main fault were made at two points with different positions: the first has a strike of 352°, a slope of 83°, the second has a strike of 175°, a slope of 75° (Fig. 11).



Fig. 9. Deposits of the rock world at the foot of the mountain on the south-western slop (left), on the right – a map of the observation area



Fig. 10. Illustration on the left of the fault plane with cracks, on the rights – an image of the study area



Fig. 11. Fault lines on the Monte Nerone ridge

Stop No. 5: On the southern slope of Monte Nerone, the outcrop represents the geological feature of the Scaglia Bianca Formation with white microclimatic limestones interspersed with black flint. The upper part contains a black layer composed of argillites and siltstones. This is an isochronous layer corresponding to the second anoxic oceanic event (Upper Cenomanian), which may contain fish remains.

The measurements of the southwest showed that the main fault has a dip angle of 340°, a slope of 71°. The angles were measured directly on the geological deposits in three

places: the first measurement – dip 145°, steepness 20°, the second measurement – dip 84°, slope 42°, the third measurement – dip 280°, slope 4° (Fig. 12).

Slightly east of the previous place on the slope of Monte Nerone, the angle of incidence was 65°, the slope was 26° (Fig. 13).

To the left of the southeastern slope of Mount Nero (Fig. 14), the angle of incidence was 150°, the slope was 72°. A map of the observation area is presented on the right.



Fig. 12. South-western slope of Monte Nerone



Fig. 13. The dimension to the east further from the previous place, angle of incidence 65°, slope 26°



Fig. 14. South-eastern slope of Monte Nerone on the left, angle of incidence 150°, slope 72°, on the right a map of the observation area

Stop No. 6: Eastern slope of Monte Nerone (Fig. 15). The outcrop represents the geological characteristic of the Maiolica Formation. Signs of a general fault with a dip of 170° and an inclination of 46° were revealed. Direct drop 50°, slope 14°, second drop 50°, slope 40°.

Stop No. 7: On the southeastern slope of Mount Montagnola, an outcrop represents the geological feature of the Maiolica Formation. No obvious traces of the fault are found, but various places indicate the continuation of the fault from Monte Nerone to La Montagnola. Two positions were measured with different depth and inclination (Fig. 16).



Fig. 15. The eastern slope of Monte Nerone

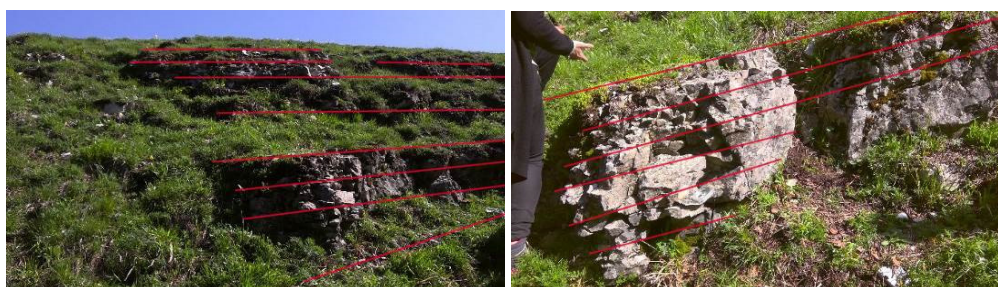


Fig. 16. South-eastern side of Mount Montagnola

Southwest direction 90° . Direct dip 265° , slope 14° , dip 165° , slope 40° (Fig. 17). To the left of the slope, two measurements were made: the first point of dip 325° , slope 30° , the second point of dip 280° , slope 27° , nearby the same dip 350° , slope 27° , down the slope of the dip 25° , slope 55° , to the right of the dip slope 315° , slope 30° .



Fig. 17. South-eastern side of Montagnola

Stop No. 8: On the southeastern slope of Mount La Montagnola. The outcrop represents the geological characteristic of the Maiolica Formation. The presence of faults with a total dip of 160° and an inclination of 49° was revealed. Direct steepness 165° , slope 27° , second standing place steepness 185° , slope 25° along the slope steepness 50° , slope 18° (Fig. 18).



Fig. 18. South-east side of La Montagnola mountain, mixed beds of Maiolica



Stop No. 9: Measurements were made on the southern slope of Pietralunga mountain, where different types of formations were found, such as ammonite-red alternating marls and limestones with a characteristic red color. Fossil formation rich in ammonites was found.

Further south is a gray, uniform and regularly layered microclimatic salt marsh formation that may contain sponge spicules, radiolarians, foraminifera, gastropods and ammonites. Here, the presence of general violations was

revealed, with a dip of 210° , an inclination of 69° . The fault separates the carnelian formation, which highlights vertical beds with a dip of 54° with a dip angle of 90° , nearby beds with a dip of 302° with a dip angle of 13° , and a control point with a dip of 225° with a dip angle of 19° . The northwestern side of the carnelian formation is shown in Fig. 19.

North-eastern side of the carnelian formation is presented on Fig. 20.

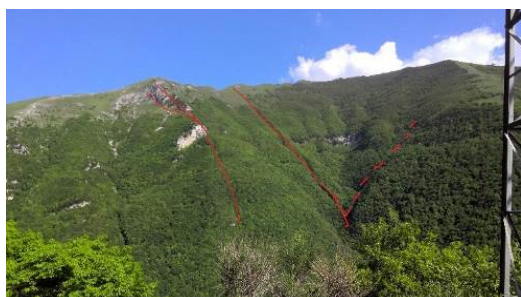


Fig. 19. North-western side of carnelian formation

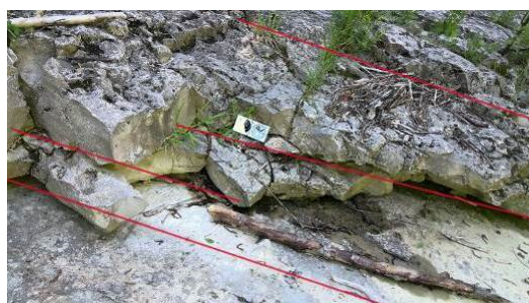
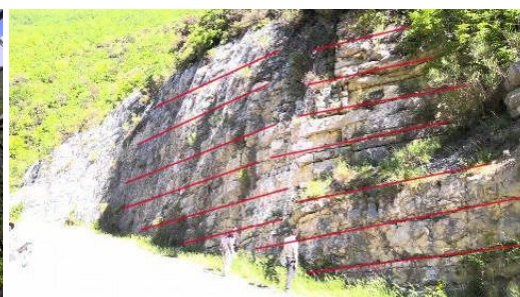


Fig. 20. Illustration of north-eastern side of carnelian formation



Results. According to the results of the conducted research and measurements of the fault and nearby outcrops along the route, it was possible to record the continuation of the Monte Nerone fault in the north-eastern direction with a length of about 9.9 km (Fig. 21). Having a CTR (Carta tecnica Regionale – regional technical documentation, 1:10 000, drawn up in the conformal representation of "Gauss-Boag" (Eastern Zone), with a geodetic reference based on the international ellipsoid centered on Monte Mario (Roma 1940),

and a geological map of the region, it became possible to confirm the existing geological deposits and refute the existence of some of them.

A 3D terrain model was created using ArcScene software and loaded into SAS Planet. As a result, the relief of the area was created and the geological situation was attached to this image. The red line marks the fault that we discovered during the route and interpretation of the collected data (Fig. 22).



Fig. 21. Superimposed CTR and orthophoto-plan with faults and survey route

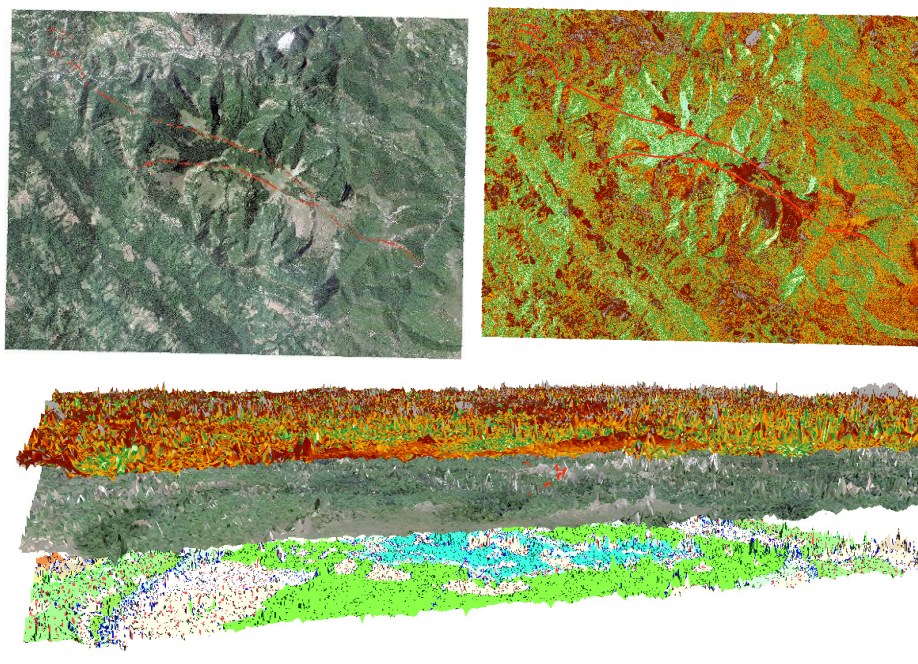


Fig. 22. Creating the image of a land plot in the form of a 3D profile

Conclusions. The conducted research has started a cycle of works to confirm (or disprove) the existence of correlations based on the Monte Nerone fault with the earthquake in the Apennines in March 1781. The fault crosses the Monte Nerone ridge (PU), continues westward north of Serravalle di Cardo, and extends southeastward to Monte La Montagnola.

Research results indicate that this area should be involved in normal kinematics and seismogenic evolution caused by related families of faults.

Signs of recent activity are observed in the studied areas.

With the help of the measurements, a hypothesis was put forward regarding the extension of the Monte Nerone fault from the west, which starts from La Valle, crosses the western, southern and eastern slopes of Monte Nerone and stretches to Monte La Montagnola, continuing to

Pietralunga, the length of which is approximately 9–10 kilometers. Taking into account the 54° dip, 90° inclination of the rocks, which were measured along the laid route, it was concluded that the earthquake was shallow, with a maximum depth of about 10 km.

References

- Butler, R.W.H., Sveva Corrado, Mazzoli, S., De Donatis, M. (2000). Time and space variability of "thin-skinned" and "thick-skinned" thrust tectonics in the Apennines (Italy). *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 11(1), 5–39. DOI:10.1007/BF02904594
- Carannante, S., Monachesi, G., Cattaneo, M., Amato, A. (2013). Deep structure and tectonics of the northern-central Apennines as seen by regional-scale tomography and 3-D located earthquakes: STRUCTURE AND TECTONICS OF CENTRAL ITALY. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 118(10), 1–13. DOI:10.1002/jgrb.50371
- Castellarin, A., Colacicchi, R., Praturion, A., Cantelli, C. (1982). The Jurassic-Lower Pliocene history of the Ancona-Anzio line (Central Italy). *Mem. Soc. Geol. It.*, 24, 325–336.

Centamore, E., Catenacci, V., Chiocchini, M., Chiocchini, U., Jacobacci, A., Martelli, G., Micarelli, A., Valletta, M. (1975). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. *Foglio 291, Pergola. Serv. Geol. d'It.*: pp. 40.

Centamore, E., Chiocchini, M., Deiana, G., Micarelli, A., Pieruccini, U. (1971). Contributo alla conoscenza del Giurassico dell'Appennino Umbro-Marchigiano. *Studi Geol. Camerti*, 1, 7–89.

Colacicchi, R., Passeri, L. & Piali, G. (1970). Nuovi dati sul Giurese umbro-marchigiano ed ipotesi per un suo inquadramento regionale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 9, 839–874.

Conti, P., Cornamusi, G., Carmignani, L. (2013). Schema tettonico dell'Appennino Settentrionale. Università di Siena. https://geotecnologie.unisi.it/wp-content/uploads/sites/110/2021/05/Conca-Marecchia_M1.pdf

De Donatis, M., Alberti, M., Cipicchi, M., Guerrero, N.M., Giulio, F., Susini, P.S. (2020). Workflow of Digital Field Mapping and Drone-Aided Survey for the Identification and Characterization of Capable Faults: The Case of a Normal Fault System in the Monte Nerone Area (Northern Apennines, Italy). *International Journal of Geo-Information*. <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/11/616>

De Donatis, M., Pappafico, G.F., Susini, S., Alberti, M., Guerrero, N.M., Ottaviani, F. (2021) A Normal Faults System in the Monte Nerone area and its significance in the recent seismo-tectonic setting of the Northern Umbria-Marche Apennines (Italy). Preprint. Discussion started: 5 July 2021. <https://doi.org/10.5194/se-2021-87>

Lavecchia, G. (1988) The Tyrrhenian-Apennines system: Structural setting and seismotectogenesis, *Tectonophysics*, 147(3), 263–296. DOI:10.1016/0040-1951(88)90190-4

Malinverno, A., Ryan, W.B.F. (1986) Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as result of arc migration driven by sinking of the lithosphere, *Tectonics*, 5 (2), 227–245. <https://doi.org/10.1029/TC005i002p00227>

Mantovani, E., Viti, M., Babbucci, D., Tamburelli, C., Vannucchi, A., Falciani, F. (2014). Assetto tettonico e potenzialità sismogenetica dell'Appennino Tosco-Umbro-Marchigiano. Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente. Siena, 2014. https://www.dsfta.unisi.it/sites/st01/files/allegatiparagrafo/23-10-2014/assetto_tettonico_e_potenzialita_sismogenetica_appennino_tosco_umbro_marchigiano_parte-1.pdf

Menichetti, M., De Feyter, A.J., Corsi, M. (1991). CROP 02-I 1 tratto Val Tiberina-Mare Adriatico. https://www.researchgate.net/publication/291781641_CROP_02-I_1_tratto_Val_Tiberina-Mare_Adriatico

Michele, M., Chiaraluce, L., Di Stefano, Waldhauser, R.F. (2020). Fine-Scale Structure of the 2016–2017 Central Italy Seismic Sequence From Data Recorded at the Italian National Network. *JGR Solid Earth*, 125, 4. <https://doi.org/10.1029/2019JB018440>

Mirabella, F., Brozzetti, F., Lupatelli, A., Barchi, M.R. (2011). Tectonic evolution of a low-angle extensional fault system from restored cross-sections in the Northern Apennines (Italy). *Tectonics*, 30, 6. <https://doi.org/10.1029/2011TC002890>

Pauselli, C., Barchi, M.R., Federico, C., Magnani, M.B. (2006) The crustal structure of the Northern Apennines (Central Italy): An insight by the CROP03 seismic line. *American Journal of Science*, 306(6). DOI:10.2475/06.2006.02

Tozer, R.S.J., Butler, R.W.H., Sveva Corrado (2002). Comparing thin- and thick-skinned thrust tectonic models of the Central Apennines, Italy. *Stephan Mueller Special Publication Series 1*. DOI:10.5194/smssps-1-181-2002

Надійшла до редколегії 21.01.23

С. Вижва¹, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: vyzhvas@gmail.com;

В. Зацерковний¹, д-р техн. наук, проф.,

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com;

І. Зобнів¹, студ.,

E-mail: ivannazobniv333@gmail.com;

М. Де Донатіс², доц.,

E-mail: mauro.dedonatis@uniurb.it;

І. Цюпа, канд. геол. наук,

E-mail: tsyura@ukr.net;

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;

²Департамент теоретичних і прикладних наук, Університет Урбіно "Карла Бо", Урбіно, 61029, Італія

КАРТОГРАФУВАННЯ ГОЛОВНОГО РОЗЛОМУ АНТИКЛІНАЛІ МОНТЕ-НЕРОНЕ (МАРКЕ – ПІВНІЧНІ АПЕННІНИ) ТА ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГІС У МОНІТОРИНГУ ЗЕМЛЕТРУСІВ

Досліджено головний розлом антикліналі Монте-Нероне (Марке – Північні Апенніни) та результати проведених досліджень з ідентифікації та фіксування розломів: нормальної системи розломів у районі Монте-Нероні та пошук кореляцій на місцевості розлому Монте-Нероні із землетрусом в Апеннінах у 1781 р. Малокутовий східний звичайний розлом, що занурюється під невеликим кутом у структуру великих деформацій, був інтерпретований на основі сейсмічних профілів земної кори. Тому сейсмічні події, зареєстровані в цій тектонічно активній зоні, можуть бути пов'язані із цим розломом, як, наприклад, нещодавні події в районі південних Умбрійсько-Маркійських Апеннін. Основною локальною тектонічною структурою є антиклінорій, орієнтований на північний-західний захід, що відповідає регіональній Апеннінській западині, з повздоєвною протяжністю близько 30 км і довжиною хвилі 5–6 км.

Робота із зондування головного розлому Монте-Нероне проходила в кілька етапів: підготовка проєкту, зйомка місцевості, обробка та синтез даних. Проєкт включає CTR регіону Марке, геодезичну опорну карту на основі міжнародного еліпсоїда з центром Монте-Маріо (Рим 1940 р.), геологічну карту масштабу 1 : 10 000 та супутникові ортофотоплани опорних територій. Довідкові шари створено у форматі шейп-файлів, для можливості каталогізувати та обмінюватися інформацією, отриманою в польових умовах. Ці рівні включили: метадані, дані, що містять вимірювання, анотацію. Під час польових робіт було сплановано маршрут та зупинки, де проводилися більш детальні вимірювання, котрі відігравали роль орієнтирів для звірки з раніше отриманими даними (для підтвердження або спростування гіпотези). У маршруті вибрано дев'ять основних зупинок, на яких проведено розвідку території, визначено геологічні характеристики пласта, проведено вимірювання та фіксацію основного розлому, його напрямку, кутів падіння та простягання, нахилу. Усі вимірювання фіксувалися в програмному середовищі та попередньо створеній базі даних. За допомогою Bluetooth GPS, підключеного до планшетного ПК, було отримано точне відстеження місця, де були проведені вимірювання.

За допомогою проведених вимірювань вдалося виділити гіпотезу про те, що розлом Монте-Неро простягається із заходу, починаючи від Ла Валле, перетинаючи західний, південний і східний схили Монте-Нероне, і простягаючись до Монте-Ла-Монтаньола та Пьетрарунга приблизно на 9,9 км. Крім того, маючи CTR з геологічною картою, ми змогли підтвердити певні геологічні поклади. Для повного врахування ситуації на місцевості в програмному забезпеченні ArcScene було створено 3D-модель рельєфу місцевості, а також позначено розлом, інтерпретовано зібрані дані. Враховуючи кут падіння 54° та нахилу 90° скель, які ми виміряли вздовж маршруту, можна припустити, що землетрус був неглибоким, із максимальною глибиною епіцентру до 10 км.

Ключові слова: ГІС, GPS, CTR, структура із руху, 3D-моделювання, історичний землетрус, сейсмічність, тектоніка розтягування.

Наукове видання



ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 1(100)

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. 16,6. Наклад 300. Зам. № 223-10642.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл1.
Підписано до друку 30.03.23

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 72; тел./факс (38044) 239 31 28
E-mail: vpc@knu.ua; vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
<http://vpc.knu.ua>
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02