

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах даних Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib та Google Scholar.

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

Jornal is indexed in Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib and Google Scholar.

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

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

Издание индексируется в наукометрических базах данных Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib и Google Scholar.

Відповідальний за випуск О.І. Меньшов

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР**РЕДАКЦІЙНА
КОЛЕГІЯ**

В.А. Михайлов, д-р геол. наук, проф.

І.М. Безродна, канд. геол. наук, ст. наук. співроб. (заст. головн. ред.); О.І. Меньшов, д-р геол. наук (відп. секр.); В.Г. Бахмутов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; С.А. Вижва, д-р геол. наук, проф.; З.О. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; В.М. Гулій, д-р геол. наук, проф.; О.В. Дубина, д-р геол. наук, проф.; В.М. Загнітко, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; В.І. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.; О.М. Іванік, д-р геол. наук, проф.; О.М. Карпенко, д-р геол. наук, проф.; М.М. Коржнев, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; І.М. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; О.Є. Кошляков, д-р геол. наук, проф.; В.Г. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; Б.П. Маслов, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О.В. Митрохин, д-р геол. наук, проф.; П.О. Міненко, д-р фіз.-мат. наук, проф.; Г.П. Міліневський, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; В.А. Нестеровський, д-р геол. наук, проф.; В.В. Огар, д-р геол. наук, проф.; М.І. Орлюк, д-р геол. наук, проф.; О.Л. Шевченко, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; В.В. Шевчук, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; С.Є. Шнюков, д-р геол. наук, доц.; Т.В. Пастушенко, канд. філол. наук, доц.; Т.А. Мірончук, канд. філол. наук, доц.

Іноземні члени редакційної колегії:

А. Веснавер, Італійський національний інститут океанографії та прикладної геофізики, Італія; Т. Діндароглу, Університет Кахраманмарас Сутцу Імам, Туреччина; А. Ель Албані, Університет Пуатьє, Франція; К. Зенг, Китайський геологічний університет; Китай, О. Івахненко, Казахстансько-Британський технічний університет, Казахстан; А. Коронеос, Університет Арістотеля в Салоніках, Греція; Г. Кулієв, Інститут геології та геофізики НАН Азербайджану; К. Лі, Китайський геологічний університет, Китай; М. Олівія, Лісабонський університет, Португалія; П. Перейра, Університет Миколаса Ромеріса, Литва; В. Портнов, Карагандинський державний технічний університет, Казахстан; С. Спассов, Геофізичний центр Доурбес, Бельгія; В. Шмідт, Університет Мюнстера, Німеччина

Адреса редколегії

ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ-22, 03022
☎ 380442597030, електронна адреса: geolvisnyk@ukr.net;
<http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua/>

Затверджено

Вченою радою ННІ "Інститут геології"
11 березня 2020 року (протокол № 8)

Атестовано

Вищою атестаційною комісією України.
Постанова Президії ВАК України
№ 1-05/6 від 12.06.02

Зареєстровано

Міністерством юстиції України.
Свідоцтво про Державну реєстрацію КВ № 23534-13374 від 08.08.18

**Засновник
та видавець**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"
Свідоцтво внесено до Державного реєстру
ДК № 1103 від 31.10.02

Адреса видавця

кімн. 43, 6-р Тараса Шевченка, 14, Київ, 01030,
☎ (38044) 239 31 72, 239 32 22; факс 239 31 28

UDC 504+550+551+552+624

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

Jornal is indexed in Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib and Google Scholar.

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах даних Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib та Google Scholar.

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

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

Издание индексируется в наукометрических базах данных Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib и Google Scholar.

Chief publication manager O. Menshov

EDITOR-IN-CHIEF

EDITORIAL BOARD

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

Ukrainian Members:

I. Bezrodna, Cand. Sci. (Geol.), Senior Researcher (Deputy Editor-in-Chief); O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), (Executive Secretary); V. Bakhmutov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher; S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; Z. Vyzhva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; V. Guliy, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Dubyna, Dr. Sci. (Geol.); V. Zagnitko, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; V. Zacerkovniy, Dr. Sci. (Tech.), Prof.; O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Karpenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; M. Korzhnev, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; I. Korchagin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; Prof.; V. Lozitsky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; B. Maslov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; O. Mytrokhin, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; P. Minenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; G. Milinevskiy, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; V. Nesterovskiy, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; V. Ogar, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; M. Orliuk, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Shevchenko, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher.; V. Shevchuk, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; S. Shnyukov, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.; T. Pastushenko, Cand. Sci. (Phil.), Assoc. Prof.; T. Mironchuk, Cand. Sci. (Phil.), Assoc. Prof.

Foreign members:

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

Address

Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine,
tel. +380442597030, e-mail: geolvisnyk@ukr.net;
<http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua/>

Approved by the

Academic Council of the Institute of Geology
March 11, 2020 (Minutes # 8)

Certified by the

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

Certified by the

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

Founded and published by

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

Address

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

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

Іванік О., Тустановська Л., Гадяцька К. Головні чинники формування та активізації гравітаційних процесів у межах Київського Придніпров'я.....	6
---	---

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

Степанюк Л., Грінченко О., Довбуш Т., Зюльцле О., Коновал Н., Мірончук Т. Віковий інтервал формування гранітоїдів Українського щита.....	12
Нестеровський В., Ішков В., Козій Є. Токсичні й потенційно токсичні елементи у вугіллі пласта с8Н шахти "Благодатна" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району	17

ГЕОФІЗИКА

Вижва С., Онищук В., Онищук І., Олійник О., Рева М., Шабатура О. Фільтраційно-ємнісні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського нафтогазового району Дніпровсько-Донецької западини.....	25
Меньшов О. Магнітні дослідження природних і техногенних процесів об'єктів критичної інфраструктури на прикладі ділянки "Глинка"	34
Безродна І., Свистов В., Безродний Д. Аналіз параметрів акустичної анізотропії піроксен-магнетитових порід Піщанської структури.....	40
Ільєнко В., Бурахович Т., Кушнір А., Попов С., Омельчук О. МТ/МВ дослідження в зоні ендоконтакту Корнинського гранітного масиву	46

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Михайлов В., Карпенко О. Перспективи нетрадиційної нафтогазоносності Південної припортової зони Дніпровсько-Донецької западини.....	53
Дьячков Б., Мізерна М., Айтбаєва С., Мірошникова А., Кузьмина О. Онгонітові дайки Східного Казахстану та специфіка їхньої рудоносності	61
Волков В., Горошкова Л., Хлобистов Є. Розвиток експортно-імпортних операцій у вугільній галузі України.....	69
Ефендієв Г., Каражанова М., Ахметов Д., Пірівердієв І. Оцінка ступеня складності вилучення важковидобувних нафт на основі їхньої класифікації	76
Каграманов К., Бабаєв М., Шпирко С., Мухтарова Х. Моделювання історії занурення та міграції вуглеводнів у Південно-Каспійській западині	82
Дубина О., Кривдік С., Бельський В., Вишневський О. Особливості берилієвої та рідкіснометалевої мінералізації в сієніті Пержанського родовища (Український щит)	92

Геологічна інформатика

Зацерковний В., Плічко Л., Приліпко О., Ніколаєнко О., Мужанова Т. Обґрунтування доцільності застосування геоінформаційних систем у ландшафтно-екологічному моніторингу	98
--	----

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

Ivanik O., Tustanovska L., Hadiatska K. Main causes of gravitation processes within the Middle Dnieper region	6
---	---

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

Stepanyuk L., Hrinchenko O., Dovbush T., Ziultsle O., Konoval N., Mironchuk T. Age span formation in granitoids of Ukrainian Shield	12
Nesterovsky V., Ishkov V., Kozii Ye. Toxic and potentially toxic elements in the coal of the seam c8H of the "Blagodatna" mine of Pavlohrad-Petropavlivka geological and industrial area	17

GEOFYSICS

Vyzhva S., Onyshchuk V., Onyshchuk I., Oliinyk O., Reva M., Shabatura O. Lower permian carbonate deposits reservoir properties of western part of Hlynsko-Solohivska area of Dnieper-Donets Depression gas-oil-bearing district.....	25
Menshov O. Magnetic studies of natural and man-made processes of critical infrastructure objects at the area "Glinka"	34
Bezrodna I., Svystov V., Bezrodny D. Analysis of acoustic anisotropy parameters of pyroxene-magnetite rocks of the Pischanka structure	40
Ilyenko V., Burakhovich T., Kushnir A., Popov S., Omelchuk O. Magnetoteluric and magnetovariate researches in the endocontact area of Korninsky granite array	46

MINERAL RESOURCES

Mykhailov V., Karpenko O. Prospects of unconventional oil and gas potential of the Southern zone of Dnieper-Donetsk Depression	53
Dyackov B., Mizernaya M., Aitbayeva S., Miroshnikova A., Kuzmina O. Ongonite dikes of Eastern Kazakhstan and the specificity of their ore content.....	61
Volkov V., Horoshkova L., Khlobystov Y. Development of export and import operations in the coal mining industry	69
Efendiyev G., Karazhanova M., Akhmetov D., Piriverdiyev I. Evaluating the degree of complexity of tight oil recovery based on the classification of oils.....	76
Gahramanov G., Babayev M., Shpyrko S., Mukhtarova Kh. Subsidence history and hydrocarbon migration modeling in South Caspian basin.....	82
Dubyna O., Kryvdik S., Belskyy V., Vyshnevskiy O. Features of berillium and rare metal mineralization in syenite of the Perga deposit (Ukrainian shield)	92

GEOLOGICAL INFORMATICS

Zatserkovnyi V., Plichko L., Prylipko O., Nikolaienko O., Muzhanova T. Substantiation of the appropriateness of applying geographic information systems in landscape-ecological monitoring	98
---	----

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Иваник Е., Тустановская Л., Гадяцкая К.

Главные факторы формирования и активизации гравитационных процессов
в пределах Киевского Приднепровья6

Минералогия, геохимия и петрография

Степанюк Л., Гринченко А., Довбуш Т., Зюльцле О., Коновал О., Мирончук Т.

Возрастной интервал формирования гранитоидов Украинского щита12

Нестеровский В., Ишков В., Козий Е.

Токсичные и потенциально токсичные элементы в угле пласта с8Н шахты "Благодатная"
Павлоградско-Петропавловского геолого-промышленного района17

ГЕОФИЗИКА

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

Фильтрационно-емкостные параметры нижнепермских карбонатных пород западной части
Глинско-Солоховского газонефтеносного района Днепровско-Донецкой впадины25

Меньшов А.

Магнитные исследования природных и техногенных процессов объектов критической инфраструктуры
на примере участка "Глинка"34

Безродная И., Свистов В., Безродный Д.

Анализ параметров акустической анизотропии пироксен-магнетитовых пород Песчанской структуры40

Ильенко В., Бурахович Т., Кушнир А., Попов С., Омельчук О.

МТ/МВ исследования в зоне эндоконтакта Корнинского гранитного массива46

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Михайлов В., Карпенко А.

Перспективы нетрадиционной нефтегазоносности Южной прибортовой зоны Днепровско-Донецкой впадины53

Дьячков Б., Мизерная М., Айтбаева С., Мирошникова А., Кузьмина О.

Онгонитовые дайки Восточного Казахстана и специфика их рудоносности61

Волков В., Горошкова Л., Хлобыстов Е.

Развитие экспортно-импортных операций в угольной отрасли Украины69

Эфендиев Г., Каражанова М., Ахметов Д., Пиривердиев И.

Оценка степени сложности извлечения трудноизвлекаемых нефтей на основе их классификации76

Каграманов К., Бабаев М., Шпырко С., Мухтарова Х.

Моделирование истории погружения и миграции углеводородов в Южно-Каспийской впадине82

Дубина А., Кривдик С., Бельский В., Вишневский А.

Особенности бериллиевой и редкометаллической минерализации в сиените Пержанского месторождения
(Украинский щит)92

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

Зацерковный В., Пличко Л., Прилипко А., Николаенко О., Мужанова Т.

Обоснование целесообразности применения геоинформационных систем
в ландшафтно-экологическом мониторинге98

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 502.58

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.01>

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

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

ГОЛОВНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ТА АКТИВІЗАЦІЇ ГРАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У МЕЖАХ КИЇВСЬКОГО ПРИДНІПРОВ'Я

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

Інтегрована оцінка та аналіз впливу гравітаційних геологічних процесів на техногенні об'єкти здійснюється на основі системного підходу до аналізу стану геологічного середовища; створення геологічних, математичних і просторових моделей і розробки розрахунково-аналітичних засобів. Комплексне застосування геолого-геоморфологічних методів (структурно-морфометричного аналізу, методу порівняльної тектоніки й структурного аналізу), даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій надало можливість підтвердити генетичний зв'язок між процесами геоморфогенезу та тектогенезу в межах Київського Придніпров'я, визначити фактори формування та активізації гравітаційних геологічних процесів, а також побудувати низку просторових моделей, що характеризують вплив геоморфологічних і тектонічних чинників на потенційний розвиток небезпечних геологічних процесів. На основі аналізу структурно-морфометричних показників було зафіксовано тектонічні структури, що найбільш прилідні в рельєфі. За допомогою карти залишкового рельєфу, що лежить вище базисних поверхонь відповідних порядків, виділено структурні зони, що відображають взаємозв'язок тектонічних та денудаційно-ерозійних і акумулятивних процесів. Цифрові моделі базисних поверхонь і залишкового рельєфу, направлені на виявлення локальних структур і спрямовані на дослідження схилових процесів території, дозволили простежити неотектонічні рухи не тільки локального, але й регіонального характеру. Залишковим рельєфом оконтурено додатні форми рельєфу приурочені до антиклінальних складок, які належать до позитивних аномалій сили тяжіння.

Ключові слова: небезпечні геологічні процеси, просторовий аналіз даних, структурна морфометрія, залишковий рельєф, дистанційне зондування Землі, геоінформаційні системи.

Вступ і постановка проблеми. Територія України характеризується значною ландшафтно-орографічною диференціацією та наявністю регіонів із різною геологічною будовою, що обумовлює суттєву різницю в інтенсивності та екстенсивності прояву низки небезпечних геологічних процесів. Серед них найкатастрофічнішими є сейсмічні процеси, водні, гравітаційні, водно-гравітаційні, гравітаційно-водні явища та процеси комбінованого характеру, які здійснюють негативний вплив на техногенні об'єкти різного призначення (Рудько, 2015).

У межах Середнього Придніпров'я серед небезпечних геологічних процесів найбільший розвиток отримали гравітаційні процеси, що обумовлені різними геолого-геоморфологічними та гідрометеорологічними чинниками (Menshov et al., 2010). Загальний аналіз просторово-часових закономірностей гравітаційних процесів у межах цього регіону підтверджує багатофакторний характер їхнього формування, однак, на перший план виходять питання пріоритетності дії кожного з факторів, а також їхня взаємозалежність за певних обставин із різною комбінацією літолого-стратиграфічних умов території, тектонічних процесів, геоморфологічної будови, гідрогеологічної ситуації тощо.

Проблемам прояву гравітаційних явищ у межах Середнього Придніпров'я присвячено низку наукових публікацій, у яких визначаються типи гравітаційних процесів різних класифікаційних категорій і груп, причини їхнього формування, а також особливості їх механізму та динаміки. Однак ці явища залишаються проблемою з невирішеними питаннями як теоретичного, так і практичного напрямку. Проведення детальних досліджень із вивчення сучасного режиму, статичних і динамічних умов формування гравітаційних явищ у межах Київського та Канівського Придніпров'я дало можливість визначити корелятивні взаємозв'язки між різними факторами розвитку гравітаційних явищ та здійснити аналіз їхня вагових значень при дії цих процесів у різних зонах. При цьому комплексне застосування геологічних та геоморфологічних методів

(структурно-морфометричного аналізу, методу порівняльної тектоніки та структурного аналізу), а також методів просторового ГІС-аналізу надало можливість підтвердити генетичний зв'язок між процесами геоморфогенезу і тектогенезу в межах Середнього Придніпров'я, між формами земної поверхні та структурами земної кори. Застосування даних дистанційного зондування Землі забезпечило якісну інтерпретацію геолого-геоморфологічних даних та дозволило побудувати низку геологічних і геоморфологічних моделей, які служать основою для прогнозування небезпечних геологічних процесів у межах дослідженої території.

Головні чинники формування та активізації гравітаційних процесів. Просторовий та часовий прогноз розвитку гравітаційних процесів виконується за різними підходами і методичним забезпеченням, де враховано чинники та особливості їхнього формування на регіональному та локальному рівні. Так, теоретичні обґрунтування прогнозів і механізмів зсувів із використанням різних принципів і підходів розглянуто в роботах Г.І. Рудька, Г.С. Золотарьова, І.Ф. Єриша, І.К. Фоменка, Є.О. Яковлева та ін. Дослідження небезпечних геологічних процесів підкреслює ефективність сучасних ГІС-методик, інтерпретації даних дистанційного зондування Землі та моделювання у попередженні та прогнозуванні негативного впливу гравітаційних процесів (Pelletier, 2008; Foster et al., 2008; Saha et al., 2005). Методи моделювання та ГІС використовуються для прогнозного картування, отримання оцінки ймовірного розвитку небезпечних геологічних процесів, створення моделей багатофакторної просторової оцінки тощо (Ivanik et al., 2018).

У Середньому Придніпров'ї процеси гравітаційної природи мають значні відмінності в Київському та Канівському районах (Беспалова, 2003; Ржаніцин, 1996; Климчук та ін., 2008). У даній статті головна увага звертається на формування гравітаційних процесів у межах Київського Придніпров'я, територія якого в тектонічному відношенні розташована в межах Білоцерківського (Фастівського) блока на північному схилі Українського

щита. В межах Київського Придніпров'я закартовано та досліджено понад 150 сучасних і давніх стабілізованих зсувів, активізація більшості з яких відбулася у березні 2013 року (рис. 1).

Аналіз факторів формування водно-гравітаційних процесів і просторовий прогноз їхнього виникнення потребували створення реляційної бази геоданих, яка містила поєднану картографічну та атрибутивну інформацію щодо прогнозних ознак виникнення зсувів (рис. 1). Морфометричні параметри зсувних тіл з характеристиками їхньої форми, ширини, довжини, об'єму зсувних мас, площі поширення, характеристик зсувних схилів, часу їхнього виникнення тощо становили основу атрибутивної таблиці даних щодо зсувів, створеної на основі власних польових спостережень та фондових матеріалів. Для визначення прогнозно-еталонних ознак зсувів, пріоритетності та інформативності факторів їх формування було використано технології геоінформаційних систем, що передбачають створення інформаційної бази концептуальної моделі регіону із сукупністю картографічних шарів і баз атрибутивної інформації, відповідною

організацією даних щодо можливих факторів виникнення сучасних екзогенних небезпечних геологічних процесів. Для цього використано програмний продукт ArcGIS фірми ESRI та його спеціалізовані модулі, перевага яких полягає в добре розвинутому інструментарії створення та обробки растрових і векторних моделей даних, особливо в області засобів оверлейного аналізу та алгебри карт, які й були використані в даних дослідженнях.

На основі поглибленого геологічного аналізу із залученням натурних даних досліджено роль літолого-стратиграфічного, структурно-тектонічного і геоморфологічного факторів формування та активізації гравітаційних процесів. Для цього створено низку просторових моделей (геологічних, геоморфологічних, структурно-морфометричних та ін.).

Одним із провідних факторів розвитку небезпечних геологічних процесів є *літолого-стратиграфічний чинник*. Зони розвитку небезпечних геологічних процесів приурочені до певних формаційних комплексів, що мають складну просторово-часову структуру з відповідними фізико-механічними властивостями породних комплексів.

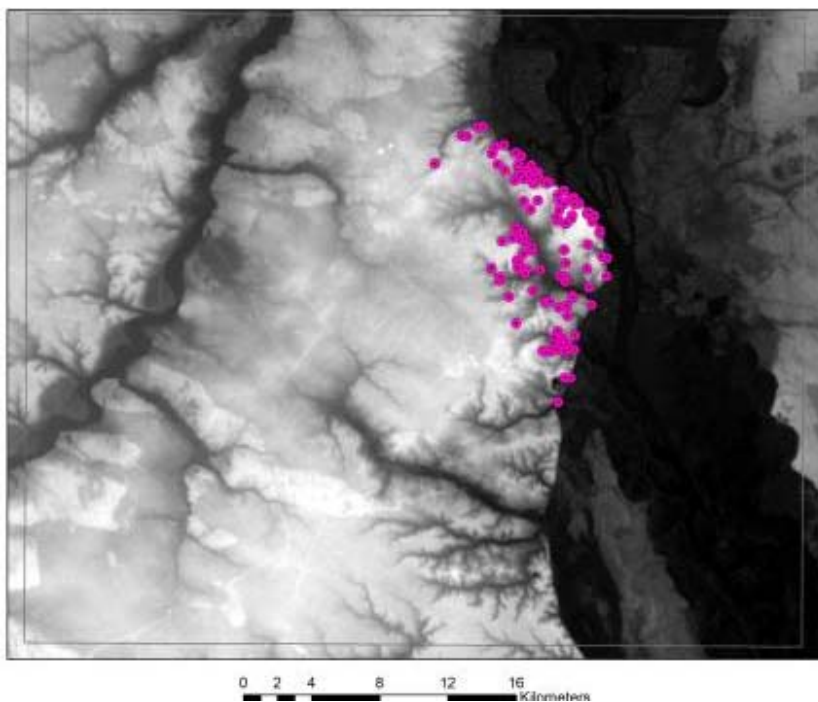


Рис. 1. Карта поширення зсувів у межах Київського Придніпров'я (крапками показано місця локалізації зсувів)

У стратиграфії району виділяються відклади палеогенової, неогенової та четвертинної систем. Наявність у розрізі мергелів київської світи, алевроїтів обухівської світи та пісків берекської та межигірської світ палеогену, пісків новопетрівської світи та строкатих глин неогену, неоген-нижньочетвертинних бурих і червоно-бурих глин, а також суглинків лесоподібних четвертинного віку створює передумови для формування структурних зсувів у неоднорідному середовищі багаторушної будови. Яскравим прикладом таких процесів є зсуви у м. Київ та його околицях (рис. 2).

Головними характеристиками *рельєфу*, що впливають на розвиток гравітаційних і водно-гравітаційних явищ, є *крутість та висота схилів*. Для визначення цих параметрів засобами ArcGIS проведено оцифрування рельєфу досліджуваного регіону і визначено їхні основні морфометричні показники. Побудовано карту тривимірного зображення рельєфу, карту кутів нахилу земної поверхні та

карту експозиції схилів. Визначено абсолютні відмітки положення зсувних тіл. Найбільш зсувонебезпечними є схили південної експозиції та крутістю 15–20°, цей параметр є одним із визначальних для їхнього формування.

Гідрогеологічні умови зсувонебезпечних схилів пов'язані із водоносними горизонтами у верхньо-, середньонеоплейстоценових алювіальних відкладах, у середньонеоплейстоценових та еоплейстоценових алювіальних і озерних відкладах, у середньонеоплейстоценових водно-льодовикових, озерно-льодовикових суглинках, нижньонеоплейстоценових еолово-делювіальних суглинках, у межигірсько-берекських і новопетрівських відкладах, еоценових відкладах. Літолого-стратиграфічні, геоморфологічні та гідрогеологічні умови у поєднанні з гідрометеорологічним чинником зумовлюють інтенсивний розвиток екзогенних процесів, серед яких переважають гравітаційні та ерозійні процеси.

Проведення структурних досліджень у межах Київського Придніпров'я, а також ГІС-аналіз підтвердили вагомий вплив *структурно-тектонічного* фактора на формування гравітаційних процесів. У межах цього регіону кристалічний фундамент розбитий серією розломів субмеридіального, субширотного, північно-східного та північно-західного простягання. У неотектонічному плані найактивнішими є регіональні структури з різницею показників сумарних амплітуд рухів до 60 м. Зоні найбільшого, Київського розлому, відповідають значні показники

середніх градієнтів швидкостей неотектонічних рухів – понад 0,01 (см/км)/тис. років. Із застосуванням функції відстаней модуля Spatial Analyst підтверджено вагому роль розломних зон у формуванні зсувів та їхній безпосередній зв'язок із тектонічними процесами. Установлено співвідношення зсувів та зон розломів, доведено їх просторові співвідношення, побудовано карту відстаней положення зсувів відносно розломів.



Рис. 2. Формування консеквентних зсувів (Київ, озеро Глинка)

Новітні та сучасні рухи земної кори мають чітку зональність прояву у рельєфі Київського Придніпров'я та чіткий вплив на створення передумов для інтенсифікації несприятливих геологічних явищ. У зв'язку з цим окрема увага приділялась проведенню *структурно-морфометричних досліджень*, що надають можливість оцінки впливу тектонічного фактора на розвиток та активізацію гравітаційних процесів. Структурна морфометрія, що спрямована на дослідження різномасштабних тектонічних структур і виявлення вертикальних рухів земної кори, є інструментом установлення генетичного зв'язку між геоморфологічними та тектонічними процесами, між формами земної поверхні та структурами земної кори. За методикою В.П. Філософова (Філософов, 1975), що полягає в графічному розкладанні рельєфу на базисні, залишкові, вершинні й ерозійні поверхні відповідно до порядків долин і вододільних ліній, для території Середнього Придніпров'я побудовано карти порядків долин і вододілів, карти базисних поверхонь десяти порядків та карти залишкового рельєфу відповідних порядків. Основою всіх побудов є карти порядків долин (рис. 3) і вододілів. Карти базисних поверхонь являють собою складні поверхні, які об'єднують місцеві базиси ерозії,

а карти вершинних поверхонь є складними поверхнями, що проходять через вододільні лінії. Базисні поверхні виражають сумарні рухи земної кори за різні проміжки часу. Створення базисних поверхонь для території дослідження здійснювалося за методикою побудови монобазисних поверхонь. На основі карти порядків долин було побудовано монобазисні поверхні десяти порядків, а на основі карт порядків вододільних ліній для території досліджень побудовано моновершинні поверхні семи порядків.

Карта долин вищих порядків відображає дочетвертинний період формування палеорельєфу Середнього Придніпров'я. Долини вищих порядків приурочені до нижніх структурних ярусів і закладаються переважно по розломних зонах та розривних порушеннях. Долини Росі та Дніпра відповідають восьмому-десятому порядкам, гідрографічна сітка має відцентровий характер, окреслюючи окремі тектонічні структури. Долина Дніпра в Середньому Придніпров'ї має найвищий 10-й порядок, що засвідчує її дочетвертинне формування. Такі долини мають велику довжину та зберігаються протягом тривалого періоду.

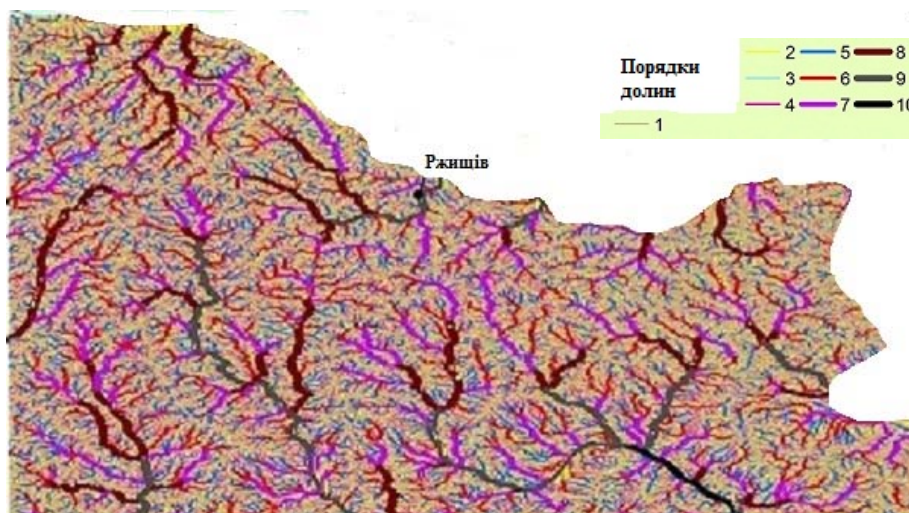


Рис 3. Фрагмент карти порядків долин Середнього Придніпров'я

Карти базисних поверхонь і карти вершинних поверхонь є статичними, що дають можливість проаналізувати зв'язок між морфометричними поверхнями та тектонічними структурами.

Найбільш інформативними з точки зору аналізу потенційного розвитку небезпечних геологічних процесів та їхнього прогнозу є карти залишкового рельєфу, за допомогою яких фіксується об'єм гірських порід, що може бути видалений у майбутньому денудаційними процесами за аналогічних геологічних і фізико-географічних умов. Розрізняється фоновий та локальний залишковий рельєф (який може бути явним і скритим). Карти залишкового рельєфу розглядають також як карти вертикального розчленування рельєфу. З метою створення карт залишкового рельєфу та локального розмиву використано дані SRTM. На основі знімка горизонталі рельєфу побудовані шляхом використання інструмента 3D Analyst (Raster Surface) в ArcGIS 10.4 з кроком 20 м.

Кожна базисна поверхня характеризується своїми значеннями залишкового рельєфу. Чим вищий порядок базисної поверхні, тим більші об'єми гірських порід переходять у

залишкові. Карта залишкового рельєфу будується шляхом віднімання базисної поверхні від гіпсометричної за методикою запропонованою П.О. Рижовим. Вона полягає в графічному накладанні базисної поверхні на гіпсометричну, обрахунку в місцях перетину різниці між числовим значенням горизонталей та ізобазит. Далі точки з однаковими значеннями з'єднують ізолініями залишкового рельєфу, що називаються ізогіпспахітами.

На основі карти порядків долин для дослідженої території Середнього Придніпров'я побудовано десять карт базисних поверхонь і дев'ять карт залишкового рельєфу. У ході досліджень було проаналізовано карти залишкового рельєфу сьомого-другого порядків (рис. 4), у межах яких зафіксовано низку локальних структур, розташованих уздовж правого схилу долини Дніпра, із відносною висотою (товщиною) скритого рельєфу від 10 до 25 м. Карти залишкового рельєфу восьмого та дев'ятого порядків не аналізувались, оскільки на них представлено залишковий рельєф, що покриває всю територію і не відрізняється диференціацією значень.

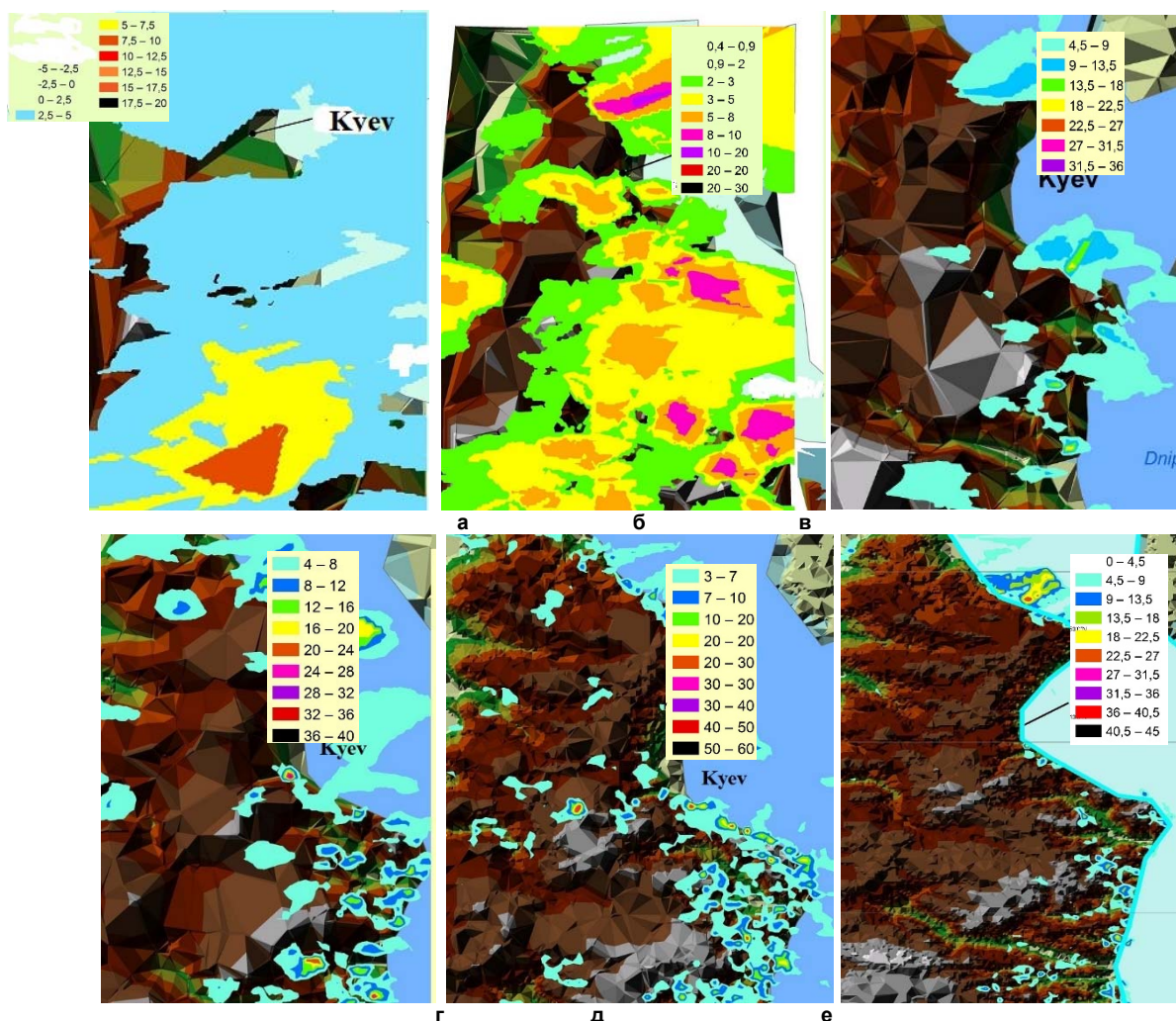


Рис 4. Карти базисних поверхонь та залишкового рельєфу 7-го (а), 6-го (б), 5-го (в), 4-го (г), 3-го (д) та 2-го (е) порядків Київського Придніпров'я

У межах Київського Придніпров'я найдавнішою є базисна поверхня сьомого порядку, що характеризує неотектонічну стадію розвитку рельєфу. Базис долини Дніпра того часу становив 90 м, перевищення у рельєфі сягало 100 м із максимальними відмітками 190 м, характерними для ділянок, що розташовані на південний захід

від Києва. Карта базисної поверхні сьомого порядку засвідчує, що русло р. Дніпро розташовувалося східніше сучасного, підтвердженням цьому є морфологічний абрис району. За картою залишкового рельєфу цього порядку простежується невелика потужність мас (до 10 м), що характерні для схилових ділянок із вищими висотними

показниками. Незначні товщі залишкового рельєфу з потужністю до 4 м покривають майже всю територію Київського блока.

На карті базисної поверхні шостого порядку фіксуються незначні зміни в тектонічному плані. Територія Київського блока сьогодні піднімається на 5 м. Простежуються підняття з висотними показниками 125–148 м на південних ділянках м. Київ. Разом із підняттям території все більше породних мас (потужністю до 20 м) переходять у залишковий рельєф, що фіксується у північній частині Києва. Максимальні товщі залишкового рельєфу є характерними для нижчих гіпсометричних рівнів, зберігаючи при цьому ті ж самі потужності. У межах морфоструктур із максимальними висотними показниками зберігаються невеликі за площею форми залишкового рельєфу з потужністю до 2 м.

На наступній стадії формування Київського Придніпров'я активність тектонічних рухів зберігається, що фіксується на карті базисної поверхні 5-го порядку. Відбувається зниження базису ерозії до 85 м та формування ділянок із висотними показниками до 200 м. Зберігається тенденція підняття локальних структур (до 5 м) у межах північних і південних схилів. Коливальні тектонічні рухи та ерозійно-денудаційні процеси призводять до руйнування нещільних гірських порід. На картах базисних поверхонь і залишкового рельєфу цього порядку в межах усього правобережжя Дніпра на висотах понад 180 м зафіксовано низку великих за площею структур із потужністю скритого рельєфу до 10 м.

Карта базисної поверхні четвертого порядку демонструє активізацію висхідних рухів, що виражається у зміні максимальних висот до 210 м. Під впливом тектонічної діяльності активізуються ерозійно-денудаційні процеси. Відбувається врізання долин і розчленування рельєфу на невеликі структури з різною крутизною схилів. Такі процеси характерні для південних частин Києва, де долина відокремлена структурою, яка сформувалася в дочетвертинний час (карта базисних поверхонь шостого порядку). Такі зміни відбуваються і на північ від м. Київ. Залишковим рельєфом фіксуються локальні структури на новоутворених схилах розчленованого палеорельєфу з потужністю до 15 м (місцями до 20 м). Вони характерні для північних схилів Києва та південної частини Київського Придніпров'я.

Карта базисної поверхні третього порядку відображає стабільність тектонічних рухів. На цій стадії висотні показники не змінюються, спостерігається лише активізація ерозійних процесів. Весь південний схил долини Дніпра має розгалужену дрібну ерозійну сітку, що розчленовує великі структури між собою. Це фіксується на картах залишкового рельєфу; маси порід, які знаходилися на схилах і мали значну потужність на попередній стадії, зменшилися за площею та змінили своє гіпсометричне положення. На основі аналізу карти залишкового рельєфу для цього періоду виділено ділянки з малопотужними відкладами, що спостерігаються переважно в підніжжях схилів.

Найбільша відносна висота залишкового рельєфу – до 50 м, спостерігається на картах базисної поверхні та залишкового рельєфу третього порядку вздовж правого схилу р. Дніпро в районі м. Київ (північні та південні ділянки) (рис. 4) та в районі північних околиць м. Ржищів, із відмітками до 170 м. Ці дані збігаються із сучасними ділянками активного розвитку гравітаційних процесів.

Передостанню стадію формування Київського блока фіксують карти базисної поверхні та залишкового рельєфу другого порядку (рис. 4, с). Відновлюється тектонічна активність району, відбувається перебудова долини Дніпра, базис ерозії знижується до 80 м, збільшуються висотні показники на 5 м, максимальні відмітки сягають 215 м. Ак-

тивізується ерозійно-денудаційна діяльність. Деякі структури, що існували на схилах правобережжя Дніпра протягом попередньої стадії неотектонічного розвитку і розташовувалися на різних висотах, були зруйновані, інші зайняли понижене положення і спостерігаються переважно в підніжжі схилів із незначною потужністю залишкового рельєфу до 10 м. Карти цього порядку дають прогнозу оцінку сучасному розвитку небезпечних геологічних процесів у межах правобережних схилів долини Дніпра.

Тектонічні порушення лінійного типу у вигляді витягнутих форм скритого залишкового рельєфу зафіксовано на всіх картах, вони розташовані вздовж правого схилу долини Дніпра та відповідають зоні регіональних розривних порушень. Аналіз карт залишкового рельєфу підтвердив інтенсифікацію тектонічних піднять протягом неоген-четвертинного етапу та виявив локальні ділянки з максимальною активною ерозійно-денудаційною діяльністю. На основі проведених досліджень встановлено інтегральну картину впливу тектонічних рухів і локальних геологічних факторів на розвиток денудації та ерозії.

Висновки. У межах Київського Придніпров'я визначено фактори формування та активізації гравітаційних процесів. Створено базу геоданих, яка поєднує картографічну та атрибутивну інформацію щодо прогнозних ознак виникнення небезпечних геологічних процесів. На основі поглибленого геологічного аналізу, структурно-морфометричних досліджень, ГІС-аналізу, систематизації фактичного матеріалу із залученням натурних даних досліджено роль літологічного, стратиграфічного, структурно-тектонічного та геоморфологічного факторів у формуванні різногенетичних небезпечних геологічних процесів у межах даного регіону. Зони розвитку цих процесів приурочені до певних формаційних комплексів, що мають складну просторово-часову структуру з відповідними фізико-механічними властивостями породних комплексів. Як свідчить аналіз картографічних і натурних даних, найбільш небезпечні геологічні процеси характерні для зон, де спостерігається поєднання декількох факторів. Доведено, що прояв несприятливих явищ будь-якого типу та категорії потребує комплексної інтегральної оцінки чинників їхнього формування із визначенням важливих складних взаємозв'язків між компонентами геологічного середовища та з'ясування особливостей взаємозалежностей між ними.

Список використаних джерел

- Беспалова, О.М. (2003). Динаміка зсувного процесу Середнього Придніпров'я на прикладі ділянки Трипілля-Канів. *Автореф. дис. ... канд. геол. наук: 04.00.07 - Інженерна геологія*. Київ.
- Климчук, Л. М., Білінов, П. В., Величко, В. Ф. та ін. (2008). Сучасні інженерно-геологічні умови України як складова безпеки життєдіяльності. К.: ВПЦ "Експрес".
- Ржаніцин, В.О. (1996). Прояви найновішої та сучасної тектоніки в геологічній будові Канівських дислокацій. *Конф до 90-річчя П.К. Загорія "Сучасний стан та перспективи розвитку геоморфології антропогену України", 20-22 травн. 1996 р., Київ*, 96-97.
- Рудько, Г.І., Осикюк, В.А. (Ред.). (2012). *Інженерна геодинаміка України і Молдови (оползневые геосистемы)*. Т.1, Т.2.
- Рудько, Г.І. (Ред.). (2015). Наукове супроводження геологічних об'єктів з метою оптимізації використання ресурсів надр (моніторинг надрокористування). Київ, Чернівці.
- Філософов, В.П. (1975). Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов.
- Foster, C., Gibson, A., Wildman, G., (2008). The new national Landslide Database and Landslide Hazard Assessment of Great Britain. *First World Landslide Forum, 18-21 Nov., 2008, Tokyo, Japan*. Отримано з <http://nora.nerc.ac.uk/4694/>.
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., Gadiatska, K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177-186. doi:10.12911/22998993/102964.
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Lavrenyuk, M., Ivankevich, G., (2018). Regional and local forecasting of landslides and debris flows and assessment of their impact on infrastructure objects. *Abstracts of 11th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the*

Environment", 13-16 Nov. 2018, Kyiv, Ukraine. Отримано з <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91316>

Menshov, O., Sukhorada, A. (2010). Magnetic properties of Ukraine soils and their informational content. 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010.

Pelletier, J., (2008). Quantitative modelling of Earth processes. Cambridge.
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.

References

Bespalova, O.M. (2003). The dynamics of the Middle Dnieper landslide process by the example of the Trypillian-Cannes section. *Extended abstract ... Cand. Geol. Sciences thesis: 04.00.07 - Engineering Geology*. Kyiv. [in Ukrainian]

Foster, C., Gibson, A., Wildman, G., (2008). The new national Landslide Database and Landslide Hazard Assessment of Great Britain. *First World Landslide Forum, 18-21 Nov., 2008, Tokyo, Japan*. Retrieved from <http://nora.nerc.ac.uk/4694/>.

Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., Gadiatska, K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177-186. doi:10.12911/2298993/102964.

Ivanik, O., Shevchuk, V., Lavrenyuk, M., Ivankevich, G., (2018). Regional and local forecasting of landslides and debris flows and assessment of their impact on infrastructure objects. *Abstracts of 11th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the*

Environment, 13-16 Nov., 2018, Kyiv, Ukraine. Retrieved from <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91316/>

Klimchuk, L.M., Blinov, P.V., Velichko, V.F. et al. (2008). Modern engineering and geological conditions of Ukraine as a component of life safety. K.:VPTS "Ekspres". [in Ukrainian]

Menshov, O., Sukhorada, A. (2010). Magnetic properties of Ukraine soils and their informational content. 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010.

Pelletier, J., (2008). Quantitative modelling of Earth processes. Cambridge.

Philosophov, V.P. (1975). Fundamentals of the morphometric method for the search for tectonic structures. Saratov. [in Russian]

Rudko G.I. (Eds.). (2015). *Naukove suprovodzhennya geologichnikh obektiv z metoyu optymizatsiyi vykorystannya resursiv nadr (monitoring nalokorystuvannya)*. Kyiv, Chernivtsi. [in Ukrainian]

Rudko, G.I., Osyuk, V.A. (Eds.). (2012). *Inzhenerna geodinamika Ukrainy i Moldovi (opolznevye geosistemy)*. Chernovtsi: Bukrek, V. 1, V. 2. [in Ukrainian]

Rzhanitsin, V.O. (1996). Manifestations of the latest and modern tectonics in the geological structure of the Kaniv dislocations. *Conf. to the 90th anniversary P.K. Zamorya "The current state and prospects of the development of geomorphology of the anthropogen of Ukraine"*, 20-22 may, 1996, Kyev, 96-97. [in Ukrainian]

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.

Надійшла до редколегії 24.12.19

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

MAIN CAUSES OF GRAVITATION PROCESSES WITHIN THE MIDDLE DNEIPER REGION

Integrated assessment and analyses of gravitational geological processes impact on the technogene objects is based on a systematic approach to the analysis of the geological environment; creation of geological, mathematical and spatial models of the geological environment, development of analytical tools. The complex application of geological and geomorphological methods (structural-morphometric analysis, comparative tectonics and structural analysis), remote sensing data and GIS technologies made it possible to identify the relationship between the processes of geomorphogenesis and tectogenesis within the Middle Dnieper area, identify the causes of gravitational geological processes, and build a series of spatial models. These models describe the impact of geomorphological and tectonic processes on the natural hazards. Based on the analysis of structural and morphometric indices, the tectonic structures, which are most elevated in relief, were recorded. Using the residual relief map, located above the baseline surfaces of the respective orders, structural zones are highlighted, reflecting the relationship of tectonic and erosion and reservoir erosion processes. Digital models of base surfaces and residual topography are aimed at the detection of local structures and the study of slope processes of the territory. Neotectonic movements of not only local but also regional character were allowed to follow. The residual relief outlines the positive forms of relief confined to anticlinal folds, which refer to the positive anomalies of gravity.

Keywords: natural hazards, spatial data analysis, structural morphometry, residual terrain, remote sensing data, geoinformation systems.

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

ГЛАВНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ И АКТИВИЗАЦИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕДЕЛАХ КИЕВСКОГО ПРИДНЕПРОВЬЯ

Комплексная оценка и моделирование влияния гравитационных геологических процессов на техногенные объекты осуществляется на основе системного подхода к анализу состояния геологической среды; создания геологических, математических и пространственных моделей, а также разработки расчетно-аналитических средств. Комплексное применение геологических и геоморфологических методов (структурно-морфометрического анализа, метода сравнительной тектоники и структурного анализа), данных дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий позволило подтвердить генетическую связь между процессами геоморфогенеза и тектогенеза в пределах Среднего Приднпровья, определить факторы формирования и активизации гравитационных геологических процессов, а также построить ряд геологических и геоморфологических моделей, характеризующих влияние геоморфологических и тектонических факторов на потенциальное развитие опасных геологических процессов. На основе анализа структурно-морфометрических показателей были зафиксированы тектонические структуры, наиболее приподнятые в рельефе. С помощью карты остаточного рельефа, лежащие выше базисных поверхностей соответствующих порядков выделено структурные зоны, отражающие взаимосвязь тектонических и денудационно-эрозионных, а также аккумулятивных процессов. Цифровые модели базисных поверхностей и остаточного рельефа, направленные на выявление локальных структур и на исследование склоновых процессов территории, позволили проследить неотектонические движения не только локального, но и регионального характера. Остаточным рельефом оконтурены положительные формы рельефа, приуроченные к антиклинальным складкам, которые относятся к положительным аномалиям силы тяжести.

Ключевые слова: опасные геологические процессы, пространственный анализ данных, структурная морфометрия, карты базисных поверхностей, остаточный рельеф, оползневые процессы, дистанционное зондирование Земли, геоинформационные системы.

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

UDC 550.93

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.02>

L. Stepanyuk¹, Dr. Sci. (Geol.),
Corresp. Member NAS of Ukraine,
E-mail: stepaniuk@nas.gov.ua;
O. Hrinchenko², PhD (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
E-mail: alexgrin@univ.kiev.ua;
T. Dovbush¹, Researcher;
O. Ziultsle¹, PhD (Geol.), Senior Researcher;
N. Konoval¹, PhD (Geol.), Senior Researcher;
T. Mironchuk², PhD (Philol.), Assoc. Prof.,
E-mail: tatianakiev99@gmail.com;
¹Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of NAS of Ukraine,
34 Palladin Ave., Kyiv, 03680, Ukraine;
²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

AGE SPAN FORMATION IN GRANITOIDS OF UKRAINIAN SHIELD

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

The paper discusses Berdychiv type granitoids that have always stirred up interest among researchers of the Ukrainian Shield. These rocks include minerals that are uncharacteristic of granites - cordierite, sillimanite, andalusite - and are closely related to rocks of the supposed substratum. At the same time, there still remain questions about the genetic nature of Berdychiv granites. Despite the fact that most researchers treat these granites as intrusive (anatectic) formations, there are other concepts according to which these granites are considered to be the products of metasomatic transformation (magmatic replacement) of primarily argillaceous and marly series of substratum.

The Stryzhavka open pit, which is located in the Upper Bug region of the Ukrainian Shield displays differently cataclised porphyry-like plagiogranitoids (predominantly, garnet-bearing varieties in its southwestern area, locally rock-forming potassic feldspar varieties), and garnet-bearing leucocratic granites similar to those of Berdychiv type granites.

The monazites of biotite-garnet granodiorite and biotite-garnet granite were dated by uranium-lead (U-Pb) isotopic dating method. The monazite of granodiorites is dated 2049,3±3,5 million years based on the upper intersection of concordia with discordia. Significantly lower values of age (about 15 million years younger) for the monazite selected from granite, approximating 2035,1±1,9 million years were established.

We assume it to be caused by prolonged crystallization of granitic melt and rather early crystallization of more basic granodioritic magma in comparison with granitic one. Thus, the duration of the granitoid formation uncovered in the Stryzhavka open pit exceeds 15 million years, which correlates accurately with the estimates for occurrence duration of the granitic melts, which gave rise to various granites of the Ukrainian Shield.

Keywords: Ukrainian Shield, Upper Bug, isotopic age, Berdychiv granite, monazite.

Introduction. Berdychiv type granitoids have always generated considerable interest among researchers, for these granites are closely associated with the rocks of the supposed substratum and contain minerals uncharacteristic of granites – cordierite, sillimanite, andalusite. Besides, the likely genetic nature of these granites still remains topical and poorly understood. Some researchers treat Berdychiv type granites as typical intrusive (anatectic) formations, while others consider them to be derived from metasomatic alteration (magmatic replacement) of primary argillaceous and marly depositions of the substratum. Also, surprising is the fact that chemical composition of these rocks type remains almost constant or similar over a large area of their distribution within the Dniester-Bug mega-block of the Ukrainian Shield. This can be treated as possible evidence that PT-conditions for crystallization are consistent or similar within various locations of Berdychiv type granites.

In 2013, the Stryzhavka open pit was ventured for field geological excursions in the course of scientific conference "Granitoids: conditions of formation and their ore-content". This open pit fully exposes possible varieties of Berdychiv type granitoids. During the conference run-up, rocks were sampled for laboratory research and relations between the established granite varieties were studied in detail. This paper shares laboratory findings on the monazite age obtained by uranium-lead dating of the monazites samples from Berdychiv type granitoids. The Stryzhavka open pit and its rock varieties outcropped are assumed to be attractive for geological excursions.

Paper aim. This paper is aimed at estimation of age span formation between early and evolved granitic varieties

of the Stryzhavka open pit, that typical of the most granitoid complexes of Ukrainian Shield.

Objects and methods of research. To distinguish the ages and time span formation in granitoid varieties that can refer to Berdychiv type granitoids (also characterized as garnet-bearing granitoids uncommon to the Ukrainian Shield) uranium-lead isotopic systems are studied in the monazites selected from the biotite-garnet granodiorite (sample 14/13), which are outcropped at the western edge of the Stryzhavka open pit, and those selected from the biotite-garnet granite (sample P-2), which are located at the open pit southern edge.

Age is dated according to classical and widely used uranium-lead methodology. Accessory monazites are studied by U-Pb isotopic method on the laboratory equipment at the Department of Radiogeochronology of IGMOF, NAS of Ukraine. Multigrain fractions of monazite grains are selected manually under optical binocular. Selected samples (weighed amounts) are preliminary treated by chemical reagents according to modified technique published in papers (Krough, 1973; Scherbak et al., 1989). Uranium and lead contents are determined by using mixed ($U^{235}+Pb^{206}$) tracer.

Isotopic ratios are analyzed at multicollector static mode on 8-collector mass spectrometer MI-1201AT. Mathematical calculations are carried out applying Pb-DAT and ISOPLOT programs (Ludwig, 1989; 1990). Normalized age is in error by 2σ. To verify zircon metrological parameters standard, "IGMOF-1" is used (Bartnitsky et al., 1995).

The Stryzhavka open pit is located to the east of Zhytomyr-Vinnytsia motorway, to the south of Stryzhavka

village (Fig. 1). Among the main varieties of rocks uncovered by open mining, there are differently cataclased porphyry-like plagiogranitoids (south-western edge of the open pit), which predominantly include garnet and, rarely, potassic feldspar as rock-forming minerals, and also garnet-bearing leucocratic granites, which are very similar to Berdychiv type granites. Granitoids vary in composition depending on the content of quartz and garnet from pure granite to granodiorite. They are also characterised by different percentage of potassic feldspar and plagioclase presence.

The western edge of the Stryzhavka open pit indicates the presence of separately layered zones of greenish-gray

plagioclarnokites, and garnet-biotite granitoids (vinnytsite-like rocks). The latter include xenoliths of pyroxene-biotite crystalloschists and garnet-biotite gneisses. Locally, there occur Berdychiv type biotite-garnet granitoids - light gray, medium-grained, gneissic and indistinctly porphyric rocks. Among the granitoids, there are also found small-sized pyroxene crystalloschists (within 12 m). Morphologically, these are lens-shaped and rarely isometric bodies, which constantly show sharp and distinct contacts with host rock. In composition, biotite-garnet and biotite-hypersthene varieties are predominant among plagiogneisses.



Fig. 1. Stryzhava open pit, satellite image. Location of granitoid samples studied geochronologically: 1 – sample 14/13, western edge of open pit; 2 – sample P-2, southern edge of open pit



Fig. 2. The Stryzhavka open pit, western edge. Location of sample 14/13

Berdychiv type biotite-garnet granites might also be found at the southern edge of the open pit, but these varieties of granites contain much less xenoliths and are more leucocratic in appearance. The detailed description of the Stryzhavka open pit and rock varieties distributed here might be found in the Excursion Guide (Stepanyuk et al., 2013).

Biotite-garnet granodiorite (sample 14/13, the Stryzhavka open pit) is gray unevenly granular cataclased rock which includes (%): 40–45 % plagioclase, 15–20 % quartz, 10–15 % potassic feldspar, about 10 % biotite, and about 5 % garnet. Among accessory minerals there are observed apatite, zircon, and monazite. The rock shows

porphyry-like structure with fine-grained granoblastic and local lepidogranoblastic groundmass. The texture is massive and slightly directive (Fig. 3).

The plagioclases are presented by strongly saussuritized porphyroblasts, small unaltered grains of groundmass and single isometric grains of strongly saussuritized plagioclase that occur within potassic feldspar aggregates.

Potassic feldspar may form both quite big (up to 4 cm in size) porphyroblastic grains that are intensively pelitized and rather small unaltered grains of rock groundmass.

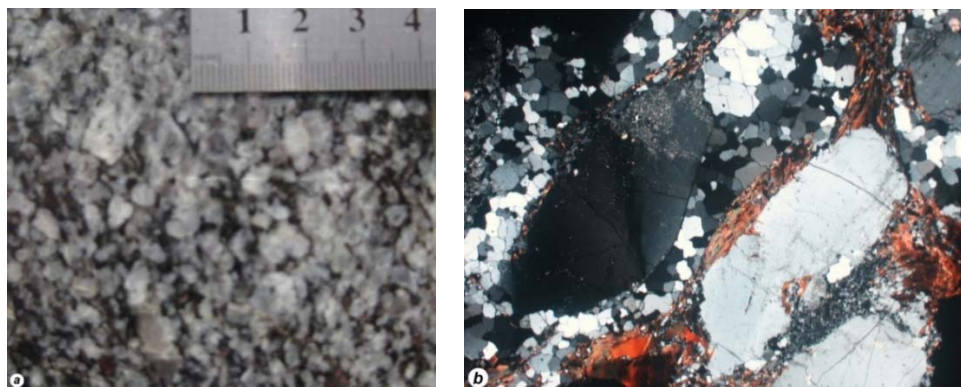


Fig. 3 Granodiorite. Sample 14/13:

a – polished section image; b – image under microscope at crossed nicols

Quartz commonly forms small grains (0,1-0,2 mm) in rock groundmass. Rarely, mineral aggregates are composed of small quartz grains (1–2 mm) or aggregates which are supposed to be formed as a result of large grains disintegration.

Garnet forms sizable grains (2–5 mm) and locally occurs as intergrowths with biotite.

Biotite is presented by two varieties. The first one occurs as highly deformed flakes which show brown-yellow pleochroism and different degree of chloritization. The second variety occurs as small flakes of green color. It commonly forms aggregates with feldspars and quartz in rock groundmass which usually look like schlieren, lenses or bands.

The rock has the following chemical composition (wt. %): SiO₂ – 63,98, TiO₂ – 0,89, Al₂O₃ – 15,27, Fe₂O₃ – 1,88, FeO – 5,15, MnO – 0,13, MgO – 2,03, CaO – 2,28, Na₂O – 3,41, K₂O – 3,32, P₂O₅ – 0,06, S – 0,13, H₂O – 0,28, LOI – 0,88, Total – 99,69.

Monazites form two types of crystals: green-yellow transparent (about 5 %) and dark (almost black) non-transparent ones (about 95 %). There are gradual transitions between these two types. Black varieties of crystals have complex structure with transparent core and black opaque margin. Black crystals show cake-like morphology and are characterized by rounded contours. After treating monazites by weak solution of hydrochloric acid black, pitch-black crystal varieties became covered with white crusts.

In thin section the monazite crystals are found rather in rock groundmass than as inclusions in quartz or potassic feldspar.

The age of biotite-garnet granodiorite is determined by uranium-lead isotopic method on green-yellow crystals selected manually under binocular. The contents of uranium, lead and their isotopic ratio are determined by the weighed amount of several multigrain fractions of monazite, which are shown in Table 1.

Table 1

Uranium-lead content and isotopic composition of lead in monazites from Berdychiv type granitoids. Sample 14/13, Stryzhavka open pit

Fraction Mnz	Content (ppm)		Isotopic ratios					Age, Ma		
	U	Pb	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}_t}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}_t}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}_t}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}_t}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}_t}{^{206}\text{Pb}_t}$
1	5454	7881	1130	7,2474	0,37509	0,43260	7,5396	2317	2178	2048,5
2	6359	7879	9030	7,8413	0,38329	0,38215	6,6492	2086	2066	2045,6
2	6058	8097	16170	7,8548	0,34948	0,38638	6,7455	2106	2079	2051,6
3	5183	7922	10350	7,8345	0,28964	0,38438	6,7037	2097	2073	2049,7
3	5565	8329	11710	7,8431	0,29981	0,38643	6,7399	2106	2078	2049,9
2	5920	7863	7860	7,8174	0,34578	0,38054	6,6302	2079	2063	2048,0
2	4965	6826	28230	7,8753	0,34118	0,39076	6,8229	2126	2089	2051,8

Note. Correction in common lead according to Stacey and Kramers aged 2050 Ma. Monazite fractions: 1 – fine (0,04 mm) light green-yellow transparent crystals of isometric shape; 2 – green-yellow transparent cake-like crystals (0,04–0,05 mm) with small black inclusions; 3 – green-yellow transparent and semi-translucent crystals with many small black inclusions.

The age of monazites from granodiorite determined on top intersection of concordia with of regression line and

calculated on data shown in Table 1 makes 2049,3 ± 3,5 Ma (Fig. 4).

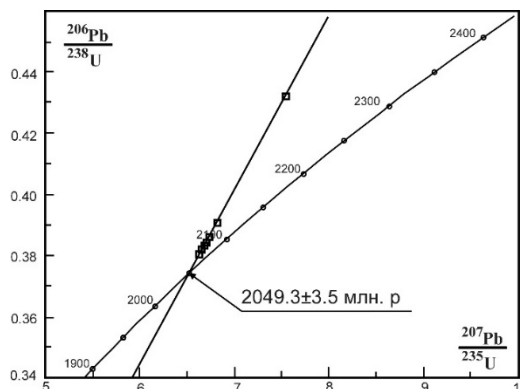


Fig. 4. U-Pb diagram with concordia for monazites from biotite-garnet granodiorite Sample 14/13, the Stryzhavka open pit

Biotite-garnet granite (sample P-2, the Stryzhavka open pit) is light grey inequigranular rock which includes (%): plagioclase – 35–40 %, quartz – 20–25 %, potassic feldspar – 20–24 %, garnet – 10 % and biotite – 5 %. Among accessory minerals, zircon, apatite and monazite are found.

Both granitoid varieties (samples) are quite similar in mineral composition and textural-structural features. The main difference is a proportion between rock-forming minerals. The light variety of granite includes mostly quartz and some biotite. Structurally, granitoids of both samples

look practically identical. Large porphyroblasts of feldspar, which are intensively altered by secondary processes, evince against the fine-grained groundmass comprised predominantly by quartz, feldspar, and locally green biotite.

Chemical composition is following (wt. %): SiO₂ – 69,42, TiO₂ – 0,10, Al₂O₃ – 14,99, Fe₂O₃ – 0,08, FeO – 3,57, MnO – 0,04, MgO – 1,20, CaO – 1,61, Na₂O – 3,33, K₂O – 4,70, P₂O₅ – 0,06, S < 0,02, H₂O – 0,06, LOI – 0,44, Total – 99,60.

Table 2

Uranium and lead contents, and isotopic composition of lead in monazites from granite of the Stryzhavka open pit. Sample P-2

Fraction Mnz	Content (ppm)		Isotopic ratios					Age, Ma		
	U	Pb	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}_t}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}_t}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}_t}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}_t}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}_t}{^{206}\text{Pb}_t}$
1	2663	8024	34250	7,9536	0,12138	0,37050	6,4094	2032	2034	2035,4
2	2629	8390	22220	7,9504	0,11262	0,36719	6,3441	2016	2025	2033,2
3	2721	8518	30120	7,9466	0,11720	0,37324	6,4598	2045	2040	2036,2
4	2621	8015	23280	7,9498	0,11935	0,37045	6,4023	2032	2033	2033,7

Note. Correction on common lead according to Stacey and Kramers aged 2050 Ma. 1–4 – light yellow transparent crystals of cake-like morphology size fractions. Fractions are selected by rolling down along oblique plane.

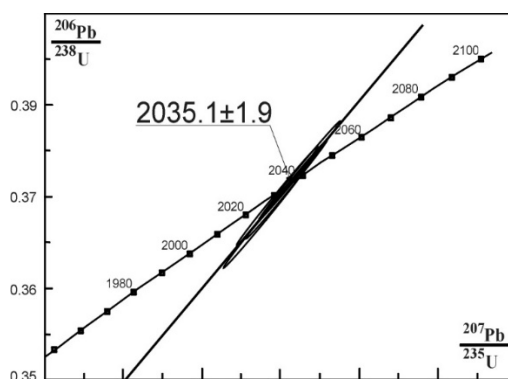


Fig. 5. U-Pb diagram with concordia for monazites from biotite-garnet granite Sample P-2, the Stryzhavka open pit

Monazites are generally presented by light yellow transparent crystals that show cake-like and rarely flattened morphology with lustrous surface and rounded edges.

The age of granite determined on monazite, which is indicated by the upper intersection of concordia with the regression line and quantified in Tabl. 2, makes 2035,1 ± 1,9 Ma (Fig. 5). Weighted average value of the age calculated according to isotopic ratio $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ makes 2034,9 ± 3,8 Ma.

Conclusion. Thus, two varieties (samples) of granitoids collected in the Stryzhavka open pit have shown significantly different age dating. Such difference unambiguously specifies a fact that the monazites selected from granodiorite crystallized a little earlier (2049 Ma) than the monazites selected from granite (2035 Ma). This is supposed to result from much earlier crystallization of granodioritic melt or more prolonged evolution of granitic melt in comparison with granodioritic one. The whole period of granitoids crystallization (evolution) uncovered in the Stryzhavka open pit exceeds 15 Ma. This age is in good agreement with estimates on the possible period of granitic melt crystallization (evolution) typical of the most granitoid complexes in the Ukrainian Shield (Stepanyuk, 2017).

Список використаних джерел

Бартницький, Е.Н., Бибилова, Е.В., Верхогляд, В.М. (1995). ИГМР-1 – Международный стандарт циркона для уран-свинцовых изотопных исследований. *Геохимия и рудообразование*, 21, 164–167.
 Степанюк, Л.М., Митрохин, А.В., Кривдик, С.Г., Томурко, Л.Л., Коновал, Н.М. (2013). Гранитоиды Волынского и Днестровско-Бугского мегаблоков Украинского щита. Путеводитель экскурсии научной конференции "Гранитоиды; условия формирования и рудоносность". Киев, ИГМР НАН Украины, 38.

Степанюк, Л.М., Курило, С.І., Сьомка, В.О., Бондаренко, С.М., Коваленко, О.О., Довбуш, Т.І., Висоцький, О.Б. (2017). Особливості U-Pb ізотопних систем цирконів і монацитів асоціації граніт – "ксеноліт": петрологічні та геологічні наслідки. *Мінералогічний журнал*, 1(39), 63–74.

Щербак, М.П., Артеменко, Г.В., Бартницький, Е.Н. (ред.) (1989). Геохронологическая шкала докембрия Украинского щита. Киев: "Наукова думка".

Krough, T.E. (1973). A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 3(37), 485–494.

Ludwig, K.R. (1989). Pb Dat for MS-DOS, version 1.06. *U.S. Geol. Survey Open-File Rept.*, 88-542, 40.

Ludwig, K.R. (1990). ISOPLOT for MS-DOS, version 2.0. *U.S. Geol. Survey Open-File Rept.*, 88-557, 38.

References

Bartnitsky, E.N., Bibikova, E.V., Verkhoglyad, V.M. (1995). IGMOF-1 – International standard of a zircon for uranium-lead isotopic researches. *Geochemistry and Ore Formation*, 21, 164–167.

Krough, T.E. (1973). A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 3(37), 485–494.

Ludwig, K.R. (1989). Pb Dat for MS-DOS, version 1.06. *U.S. Geol. Survey Open-File Rept.*, 88-542, 40.

Ludwig, K.R. (1990). ISOPLOT for MS-DOS, version 2.0. *U.S. Geol. Survey Open-File Rept.*, 88-557, 38.

Shcherbak, M.P., Artemenko, G.V., Bartnitsky, E.N. (Eds.) (1989). Geochronological scale of Precambrian of Ukrainian Shield. *Kiev: "Naukova dumka"*.

Stepanyuk, L.M., Mitrokhin, A.V., Krivdik, S.G., Tomurko, L.L., Konoval, N.M. (2013). Granitoids of Volyn and Dniester-Bug megablocks of Ukrainian Shield. *Excursion guide of scientific conference "Granitoids: conditions of formation and ore content"*, Kiev, IGMOF NAS of Ukraine, 38.

Stepanyuk, L.M., Kurylo, S.I., Semka, V.A., Bondarenko, S.M., Kovalenko, A.A., Dovbush, T.I., Vysotsky, O.B. (2017). Features of U-Pb isotopic systems of zircons and monazites of granite-"xenolith" association: petrological and geological consequences. *Mineralogical Journal*, 1(39), 63–74.

Надійшла до редколегії 14.11.19

Л. Степанюк¹, д-р геол. наук, член-кор. НАН України,

E-mail: stepaniuk@nas.gov.ua;

О. Грінченко², канд. геол.-мінералог. наук, доц.,

E-mail: alexgrin@univ.kiev.ua;

Т. Довбуш¹, наук. співроб.;

О. Зюльцле¹, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.;

Н. Коновал¹, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.;

Т. Мірончук², канд. філол. наук, доц.,

E-mail: tatianakiev99@gmail.com;

¹Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення НАН України,

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

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

ВІКОВИЙ ІНТЕРВАЛ ФОРМУВАННЯ ГРАНІТОЇДІВ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА

Розглядається гранітоїди Бердичівського типу, які завжди викликали інтерес багатьох дослідників Українського щита. Дані породи містять нетипові для гранітів мінерали – кордиєрит, силіманіт, андалузит і тісним чином пов'язані з породами можливого субстрату. Усе ж ще залишається відкритим питання щодо генетичної природи бердичівських гранітів. Незважаючи на той факт, що більшість дослідників відносять граніти бердичівського типу до інтрузивних (анатектичних) утворень, існують й інші припущення, згідно з якими ці граніти розглядаються як продукти метасоматичного перетворення (магматичного заміщення) первинно глинисто-мергелистих товщ субстрату.

Стрижавським кар'єром, який розташований у регіоні Верхнього Побужжя Українського щита, нерівномірно розкриті катаклазовані порфіроподібні плагіогранітоїди (гранатемісні різновиди – переважно в південно-західній частині кар'єру та локально – різновиди з породотвірним калишпатом) і гранатемісні лейкократові граніти, які є подібними до гранітів бердичівського типу.

Уран-свинцевим ізотопним методом було визначено вік монацитів з біотит-гранатового гранодіориту і біотит-гранатового граніту. Вік монациту з гранодіориту, який був розрахований за верхнім перетином конкордії з дискордією, становить $2049,3 \pm 3,5$ млн років. Істотно менші значення віку (майже на 15 млн років молодше) було отримано для монациту з граніту – $2035,1 \pm 1,9$ млн років. Цей факт, на наш погляд, обумовлений тривалою кристалізацією гранітного розплаву й відносно ранньою кристалізацією більш основної гранодіоритової магми порівняно з гранітною. Таким чином, загальний період (тривалість) формування гранітоїдів, розкритих Стрижавським кар'єром, перевищує 15 млн років, що добре узгоджується з оцінками тривалості існування гранітоїдних розплавів, які спричинили формування різноманітних гранітоїдів Українського щита.

Ключові слова: Український щит, Верхнє Побужжя, ізотопний вік, бердичівський граніт, монацит.

Л. Степанюк¹, д-р геол. наук, член-кор. НАН України,

E-mail: stepaniuk@nas.gov.ua;

А. Грінченко², канд. геол.-мінералог. наук, доц.,

E-mail: alexgrin@univ.kiev.ua;

Т. Довбуш¹, науч. сотр.;

О. Зюльцле¹, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.;

О. Коновал¹, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.;

Т. Миرونчук², канд. филол. наук, доц.,

E-mail: tatianakiev99@gmail.com;

¹Институт геохимии, минералогии и рудообразования НАН Украины,

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

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

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

ВОЗРАСТНОЙ ИНТЕРВАЛ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИТОИДОВ УКРАИНСКОГО ЩИТА

Рассматриваются гранитоиды Бердичевского типа, которые всегда вызывали интерес многих исследователей Украинского щита. Данные породы содержат нетипичные для гранитов минералы – кордиерит, силлиманит, андалузит и тесным образом связаны с породами предполагаемого субстрата. В то же время, все еще остаются открытыми вопросы относительно генетической природы бердичевских гранитов. Несмотря на тот факт, что большинство исследователей относят граниты бердичевского типа к интрузивным (анатектическим) образованиям, существуют и другие представления, согласно которым эти граниты рассматриваются как продукты метасоматического преобразования (магматического замещения) первично глинисто-мергелистых толщ субстрата.

Стрижавским карьером, который расположен в регионе Верхнего Побужья Украинского щита, в различной степени раскрытые катаклазированные порфировидные плагиогранитоиды (гранатемещающие разновидности – преимущественно в юго-западной части карьера, и разновидности с породообразующим калишпатом – локально) и гранатемещающие лейкократовые граниты, сходные с гранитами бердичевского типа.

Уран-свинцовым изотопным методом был определен возраст монацитов из биотит-гранатового гранодiorита и биотит-гранатового гранита. Возраст монацита из гранодiorита, который был рассчитан по верхнему пересечению конкордии с дискордией, составляет $2049,3 \pm 3,5$ млн лет. Существенно меньшие значения возраста (почти на 15 млн лет моложе) были получены для монацита, выделенного из гранита – $2035,1 \pm 1,9$ млн лет. Это, на наш взгляд, обусловлено продолжительной кристаллизацией гранитного расплава и относительно ранней кристаллизацией более основной гранодiorитовой магмы по сравнению с гранитной. Таким образом, продолжительность формирования гранитоидов, раскрытых Стрижавским карьером, превышает 15 млн лет, что хорошо согласуется с оценками продолжительности существования гранитоидных расплавов которые обусловили формирование различных гранитоидов Украинского щита.

Ключевые слова: Украинский щит, Верхнее Побужье, изотопный возраст, бердичевский гранит, монацит.

УДК 553.94:550.42

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.03>

В. Нестеровський, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: v.nesterovskii@ukr.net,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
В. Ішков, канд. геол.-мінералог. наук, доц.,
E-mail: ishwhw37@gmail.com;
Є. Козій, канд. геол. наук, заст. директора,
E-mail: koziy.es@gmail.com,
Національний технічний університет "Дніпровська політехніка",
пр. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна

ТОКСИЧНІ Й ПОТЕНЦІЙНО ТОКСИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ У ВУГІЛЛІ ПЛАСТА C_8^H ШАХТИ "БЛАГОДАТНА" ПАВЛОГРАДСЬКО-ПЕТРОПАВЛІВСЬКОГО ГЕОЛОГО-ПРОМИСЛОВОГО РАЙОНУ

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

Токсичні елементи у вугіллі є одним з основних забруднювачів навколишнього середовища. Їхній вміст у вугіллі є достатньо високим, тому сучасне підвищення екологічних вимог потребує врахування впливу вугледобувних підприємств на стан середовища. Це, у свою чергу, обумовлює потребу в нових науково обґрунтованих методах прогнозу вмісту токсичних і потенційно токсичних елементів (ТіПТЕ) у гірничій масі, що видобувається шахтами, а також у відходах видобутку та вуглезабагачення.

Розглянуто результати дослідження ТіПТЕ у вугіллі пласта C_8^H поля шахти "Благодатна" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Донбасу з метою встановлення закономірностей їхнього просторового розподілу. Визначено середній вміст і латеральні варіації концентрації ТіПТЕ у вугіллі пласта, побудовано карти ізоконцентратів ТіПТЕ і карти регіональної складової зміни їхнього вмісту для дослідженої площі. Побудовані карти є фактологічною основою для довгострокового прогнозу концентрацій ТіПТЕ у видобутій шахтою гірській масі. Для цього розраховано лінійні рівняння регресії, які характеризують зв'язок між концентраціями ТіПТЕ і основними технологічними параметрами дослідженого пласта. Ці рівняння можуть бути використані для короткострокового і середньострокового прогнозу вмісту ТіПТЕ у гірській масі, що видобувається. У свою чергу, такий прогноз має служити основою для технологічних рішень, спрямованих на зниження вмісту ТіПТЕ у продуктах та відходах вуглезабагачення.

Крім того, аналіз результатів статистичної обробки геохімічної інформації й геолого-структурної характеристики пласта C_8^H поля шахти "Благодатна" свідчить, що формування асоціації $Co-Ni-V-Pb-Cr-Mn$ пов'язано із збагаченням цими елементами приконтактових зон вугільного пласта потужністю 0,15–0,20 м. Доведено, що Be є єдиним елементом, переважно пов'язаним з органічною складовою вугілля. Асоціація Hg і As обумовлена їхнім генетичним зв'язком із сульфідною мінералізацією тріщинуватих зон тектонічної природи.

Ключові слова: вугільний пласт, потужність, зола, сірка, токсичні і потенційно токсичні елементи, карта ізоконцентратів, карта регіональної складової, рівняння регресії.

Вступ. Досліджувана територія розташована в межах Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Західного Донбасу і адміністративно належить до Павлоградського району Дніпропетровської області. Зростання вимог до охорони навколишнього середовища обумовлює потребу в нових науково обґрунтованих методах прогнозу вмісту токсичних і потенційно токсичних елементів (ТіПТЕ) у гірській масі, що видобувається шахтами, відходах видобутку і вуглезабагачення. Особлива актуальність даної проблеми визначається Законом України "Про надра", постановами Кабінету Міністрів України № 22 від 30.09.1995 р. та № 688 від 28.06.1997 р., а також нормативними документами ДКЗ (Клер, 1982).

Огляд попередніх досліджень. Раніше В. Ішковим, спільно з А. Чорнобук, Д. Михальчонок, В. Дворецьким (Ішков, 1999; Ішков і др., 2001), розглянуто особливості розподілу деяких ТіПТЕ у продуктах і відходах збагачення ряду вуглезабагачувальних фабрик Донбасу. Крім того, В. Ішковим спільно з Є. Козій (Ішков та Козій, 2017; Козій, 2018) досліджено особливості розподілу ТіПТЕ у вугіллі пластів деяких шахт Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Західного Донбасу. І. Курмельовим вивчалась геохімія вуглевмісних порід Чистяково-Сніжнрянського геолого-промислового району Донбасу (Курмельов, 2013). А. Дворников займався вивченням ртутності вугілля Донецького басейну (Дворников, 1987). Також токсичним елементам посвячено багато робіт А. Горового і Н. Горової (Горовой, 2001; Горовой і Горовая, 2002). Екологічні аспекти геохімії ТіПТЕ у вугільних пластах багатьох родовищ світу розглянуто в роботах Д. Суейна (Godbeer et al., 1984; Swaine, 1990). Численні дослідження розповсюдження

ТіПТЕ у вугіллі різних родовищ дозволили встановити, що склад і вміст цих елементів та їхні особливості розподілу відрізняються щодо кожного родовища, а в межах окремих родовищ залежить ще й від стадії вуглефікації (Martinez-Tarazona et al., 1992; Mercer et al., 1993; Pires and Teixeira, 1992; Solari et al., 1989; Spears and Martinez-Tarazona, 1993; Vassilev, 1994). Водночас, розгляд і аналіз розподілу ТіПТЕ у вугіллі пласта C_8^H шахти "Благодатна" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району раніше не виконувався.

Мета роботи: установити закономірності в розподілі ТіПТЕ у вугіллі пласта C_8^H поля шахти "Благодатна" ПАТ "ДТЕК Павлоградвугілля".

Методика досліджень. Розгляд розподілу ТіПТЕ у геологічних об'єктах різного характеру і масштабу є необхідним для встановлення законів їхньої міграції, концентрації й розсіювання. Особливість виконаних досліджень полягала в неможливості безпосереднього спостереження цих процесів. У цьому випадку розгляд динаміки процесів традиційно виконується шляхом порівняння статистичних даних та аналізу картографічних матеріалів щодо розподілу хімічних елементів у розглянутих об'єктах. Потім отримані результати осмислюються з урахуванням фізико-хімічних і геологічних особливостей.

Отже, отримання інформації про розподіл хімічних елементів у геологічних об'єктах є першим етапом дослідження, що йде від узагальнення фактичного матеріалу, через його теоретичне осмислення, до перевірки виявлених закономірностей дослідним шляхом.

Проби відбиралися у гірських виробках (пластові проби, відібрані борозновим способом (Угли..., 1975) і з дублікатів керна особисто авторами за участю співробітників геологічних служб вугледобувних підприємств і

виробничих геологорозвідувальних організацій в період з 1981 р. по 2013 р. Обсяг контрольного випробування становив 5 % від загального обсягу проб. Усі аналітичні роботи виконувалися в центральних сертифікованих лабораторіях виробничих геологорозвідувальних організацій. Вміст Hg визначався атомно-абсорбційним аналізом, As (Топливо..., 1993), інші ТіПТЕ – кількісним емісійним спектральним аналізом (Узлі..., 1991). На внутрішній лабораторний контроль направлено 7 % дублікатів проб. Зовнішньому лабораторному контролю піддано 10 % дублікатів проб. Якість результатів аналізів (правильність і відтворюваність) оцінювалася як значимість середньої систематичної похибки, яка перевіряється за допомогою критерію Стюдента, і значимість середньої випадкової похибки, яка перевіряється за допомогою критерію Фішера. Оскільки вказані вище похибки при рівні значимості 0,95 є не значимими, якість аналізів визнано задовільною.

На початковому етапі обробки первинної геохімічної інформації за допомогою програм Excel 2016 і Statistica 6.0 розраховувалися значення основних описових статистичних показників (вибіркового середнього арифметичного, його стандартної помилки, медіани, ексцесу, моди, стандартного відхилення, дисперсії вибірки, мінімального і максимального значення вмісту, коефіцієнта варіації, асиметрії вибірки), виконувалась побудова частотних гістограм вмісту і встановлення закону розподілу ТіПТЕ.

З метою виявлення складу геохімічних асоціацій були розраховані коефіцієнти кореляції (r) між вмістом ТіПТЕ. В єдину геохімічну асоціацію об'єднувалися елементи, у яких зв'язок між вмістом описується коефіцієнтом кореляції, що перевищує 0,5 з рівнем значимості не менше 95 %.

При оцінці зв'язку токсичних і потенційно токсичних елементів з органічною або мінеральною частиною вугілля використовувалися коефіцієнти спорідненості з органічною речовиною F_o , що показує відношення вмісту елементів у вугіллі з малою ($<1,6$) і високою щільністю ($>1,7$), коефіцієнти наведеної концентрації $F_{нк}$, що показують відношення вмісту елементів у фракції i (C_i) до вмісту у вихідному вугіллі, коефіцієнти кореляції вмісту досліджуваних елементів і зольності вугілля та коефіцієнти наведеного вилучення елемента у фракції різної щільності.

При побудові всіх карт використовувалася програма Surfer 11. У ході побудови карт, графіків і розрахунку коефіцієнтів кореляції всі значення концентрацій ТіПТЕ нормувалися за формулою

$$X_{норм} = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}),$$

де X_i – результат одиничного визначення концентрації елемента, X_{max} та X_{min} – максимальна та мінімальна концентрації елемента відповідно. Нормування здійснювалося для уніфікації шкали концентрацій у вибірках.

Одержані результати та їхнє обговорення. Закономірності зміни вмісту миш'яку. Вміст As у вугіллі пласта (рис. 1, а) характеризується значними варіаціями. Він змінюється у межах від 5,46 г/т до 426,73 г/т і не пов'язаний з напрямком падіння, глибиною та потужністю вугільного пласта, концентрацією золи вугілля. Середнє значення вмісту миш'яку по пласту становить 124,2 г/т. Найбільше значення вмісту As міститься в південній частині шахтного поля. Воно просторово збігається із свердловиною № Н32086. Карта зміни регіональної складової концентрації As, представлена на (рис. 1, б), показує збільшення його вмісту у вугіллі пласта $c_{вг}$ у північно-західному напрямку. Миш'як формує геохімічну асоціацію із ртуттю ($r = 0,94$) та пов'язаний із вмістом у вугіллі сірки загальної ($r = 0,98$). Лінійні рівняння регресії: $As = -0,1172 + 1,1079 \times Hg$; $As = -0,0385 + 1,045 \times S_{заг}$.

Закономірності зміни вмісту берилію. Коливання концентрації Be у вугіллі пласта від 1,33 г/т до 5,94 г/т (рис. 2, а) при середньому значенні – 3,63 г/т. Найбільші значення вмісту берилію – у північно-східній

частині шахтного поля на ділянці свердловин № 7815, № 7740, № 7752. Концентрація Be не залежить від глибини, потужності пласта та вмісту загальної сірки у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього елемента зростає в напрямку падіння пласта в північно-східному напрямку (рис. 2, б) у бік від УКЩ.

Спостерігається тісна зворотна статистична залежність між вмістом Be і золюю ($r = -0,94$), фтором ($r = -0,91$). Лінійні рівняння регресії:

$$Be = 0,8771 - 0,8705 \times A_d; \quad Be = 0,931 - 0,9465 \times F.$$

Закономірності зміни вмісту кобальту. Вміст кобальту змінюється у межах від 1,24 г/т до 12,11 г/т (рис. 3, а). Середнє значення концентрації кобальту по пласту становить 7,54 г/т. Максимальні значення встановлено в західній і північно-західній частині шахтного поля. Найбільша локація кобальту міститься на північному заході ділянки і приурочена до свердловини № 4095. Концентрація Co не залежить від глибини, вмісту загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту Co зростає в північно-західному напрямку (рис. 3, б).

Встановлено тісний зворотний зв'язок між вмістом кобальту і потужністю вугільного пласта ($r = -0,91$), тісний прямий зв'язок із кумуляцією марганцю ($r = 0,80$), нікелю ($r = 0,78$), свинцю ($r = 0,85$), хрому ($r = 0,88$), ванадію ($r = 0,88$). Лінійні рівняння регресії:

$$Co = 0,9954 - 0,8555 \times m;$$

$$Co = 0,182 + 0,7816 \times Mn;$$

$$Co = 0,2779 + 0,6913 \times Ni;$$

$$Co = 0,1806 + 0,8153 \times Pb;$$

$$Co = 0,1459 + 0,8812 \times Cr;$$

$$Co = 0,1231 + 0,8673 \times V.$$

Закономірності зміни вмісту марганцю. Концентрація марганцю варіює від 53,98 г/т до 190,25 г/т. Середнє значення вмісту марганцю по пласту становить 123,29 г/т. Найбільша локація приурочена до ділянки пласта в районі свердловини № 4095, яка розташована в північно-західній частині шахтного поля (рис. 4, а). Кумуляція Mn не залежить від глибини, вмісту загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього елемента зростає в північно-західному напрямку (рис. 4, б).

Виявлено тісний зворотний зв'язок між вмістом марганцю і потужністю вугільного пласта ($r = -0,86$), тісний прямий зв'язок з концентрацією кобальту ($r = 0,80$), нікелю ($r = 0,75$), свинцю ($r = 0,86$), хрому ($r = 0,83$), ванадію ($r = 0,85$). Лінійні рівняння регресії:

$$Mn = 0,9161 - 0,8383 \times m;$$

$$Mn = 0,0295 + 0,8267 \times Co;$$

$$Mn = 0,2112 + 0,6817 \times Ni;$$

$$Mn = 0,0933 + 0,8487 \times Pb;$$

$$Mn = 0,0885 + 0,8537 \times Cr;$$

$$Mn = 0,053 + 0,8658 \times V.$$

Закономірності зміни вмісту нікелю. Кумуляція нікелю коливається у межах від 13,04 г/т до 38,5 г/т (рис. 5, а). Середнє значення по пласту становить 24,15 г/т. Найбільша локація нікелю – у північно-західній частині шахтного поля і пов'язана із свердловиною № 4106. Вміст Ni не залежить від глибини, концентрації загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього елемента зростає в північно-західному напрямку (рис. 5, б).

Установлено тісний зворотний зв'язок між вмістом нікелю і потужністю вугільного пласта ($r = -0,88$), тісний прямий зв'язок з концентрацією кобальту ($r = 0,78$), марганцю ($r = 0,75$), свинцю ($r = 0,82$), хрому ($r = 0,84$), ванадію ($r = 0,85$). Лінійні рівняння регресії:

$$Ni = 0,8903 - 0,9339 \times m;$$

$$Ni = -0,0697 + 0,8731 \times Co;$$

$$Ni = 0,0223 + 0,814 \times Mn;$$

$$Ni = 0,0039 + 0,8838 \times Pb;$$

$$Ni = -0,0285 + 0,9446 \times Cr;$$

$$Ni = -0,062 + 0,9471 \times V.$$

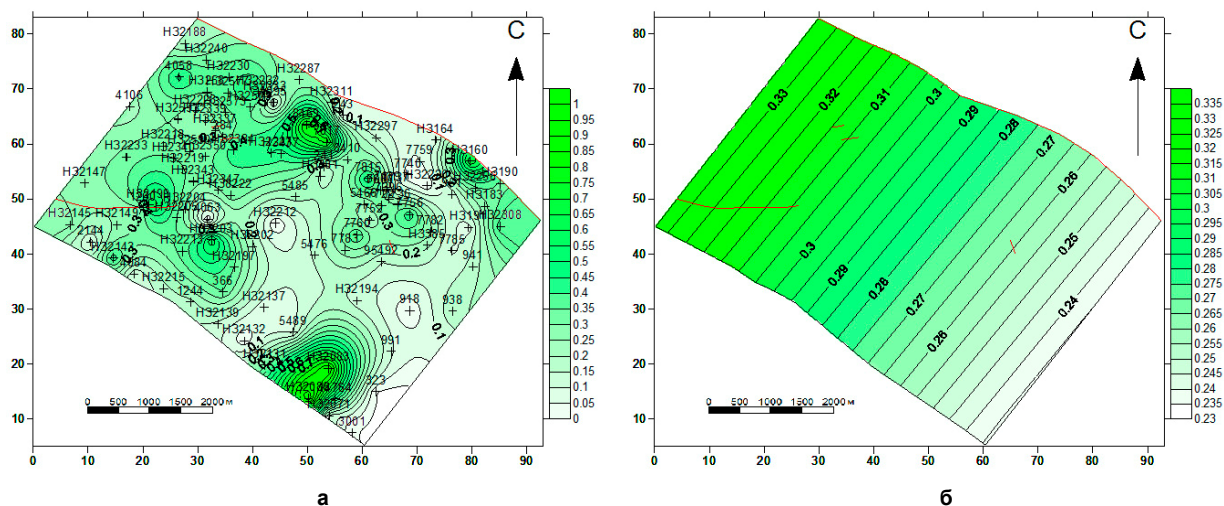


Рис. 1. Карта ізоконцентрат вмісту As (а) та карта зміни регіональної складової концентрації As (б) у вугіллі пласта С₈"

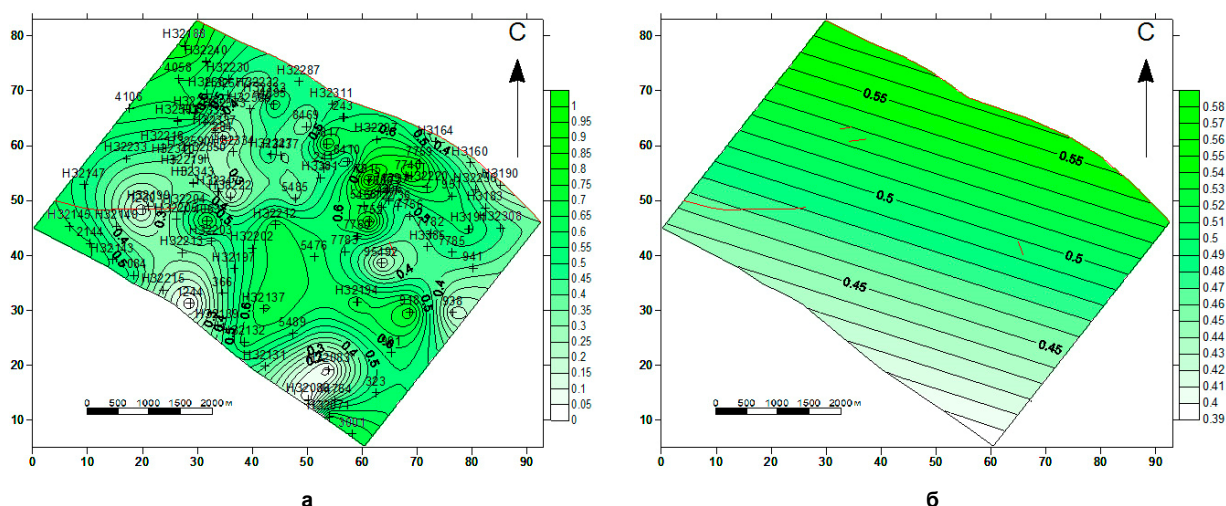


Рис. 2. Карта ізоконцентрат вмісту Be (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Be (б) у вугіллі пласта С₈"

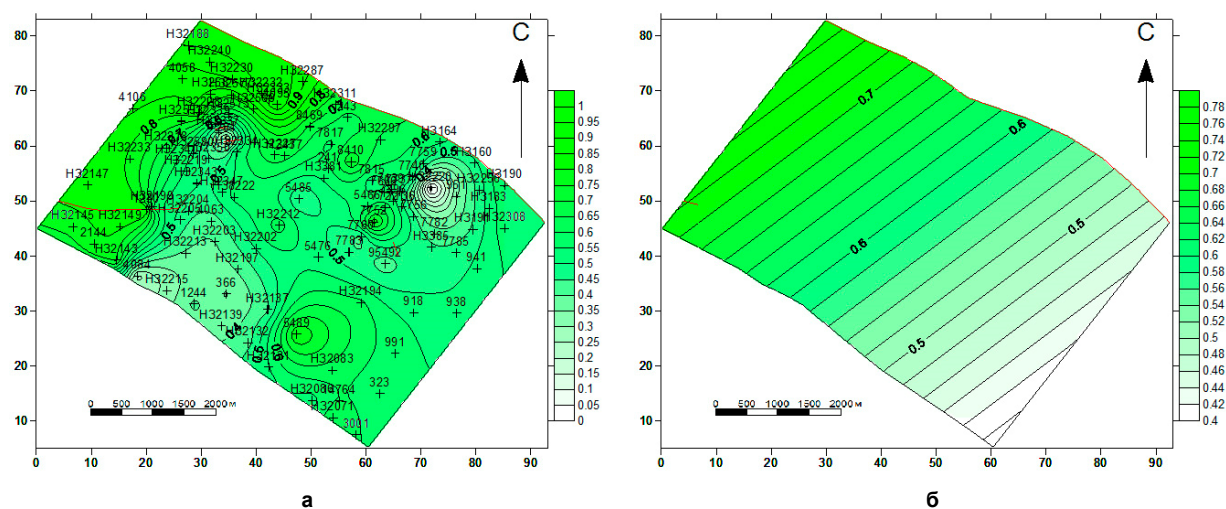


Рис. 3. Карта ізоконцентрат вмісту Co (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Co (б) у вугіллі пласта С₈"

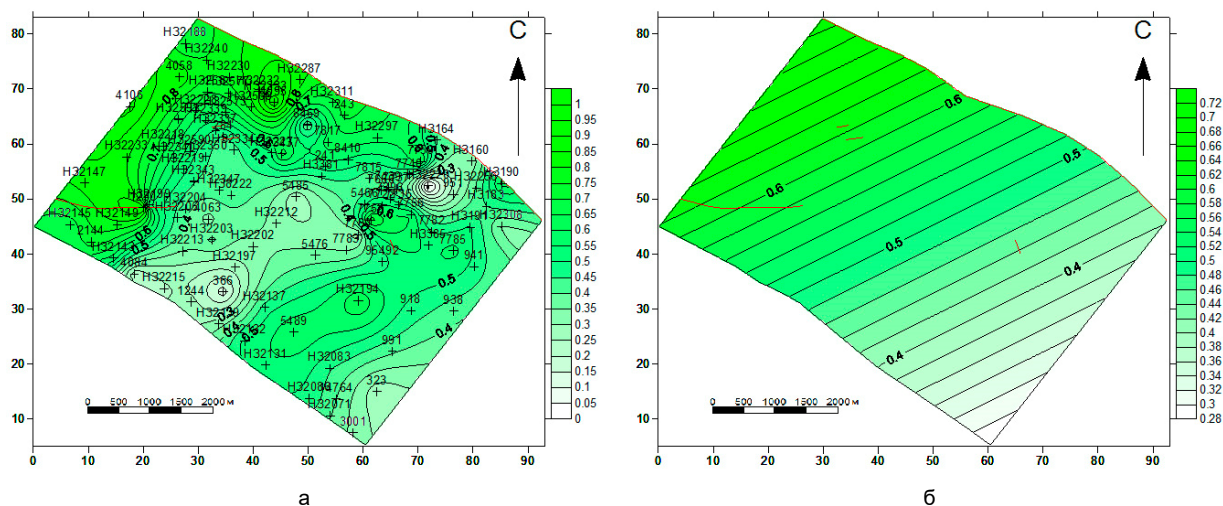


Рис. 4. Карта ізоконцентрат вмісту Mn (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Mn (б) у вугіллі пласта c_8^d

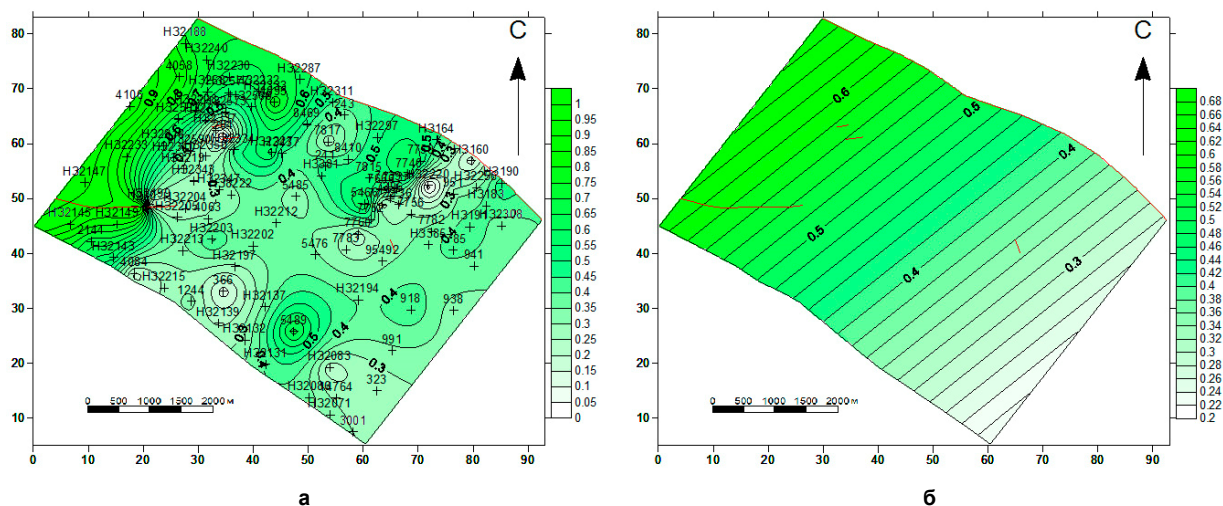


Рис. 5. Карта ізоконцентрат вмісту Ni (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Ni (б) у вугіллі пласта c_8^d

Закономірності зміни вмісту ртуті. Зони підвищеного вмісту ртуті розташовані в північній і південній частині шахтного поля. Концентрація Hg варіює в межах від 0,0165 г/т до 0,6421 г/т (рис. 6, а). Середнє значення по пласту – 0,2418 г/т. Найбільша локація Hg розташована в південній частині шахтного поля і приурочена до свердловини № Н32083. Вміст Hg не залежить від глибини, потужності пласта та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього елемента зростає в північно-західному напрямку (рис. 6, б).

Установлено тісний прямий зв'язок між вмістом ртуті й сірки загальної у вугіллі пласта ($r = 0,96$) та з концентрацією миш'яку ($r = 0,94$). Лінійні рівняння регресії:
 $Hg = 0,1017 + 0,8514 \times S_{\text{заг.}}$; $Hg = 0,1338 + 0,8034 \times As$.

Закономірності зміни вмісту свинцю. Вміст свинцю в межах пласта змінюється від 66,85 г/т до 178,63 г/т. Середнє значення по пласту становить 121,54 г/т. Найбільша локація цього елемента встановлена в північно-західній частині шахтного поля на ділянці свердловини № 4095 (рис. 7, а).

Концентрація Pb не залежить від глибини, вмісту загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту Pb зростає в північно-західному напрямку (рис. 7, б).

Установлено тісний зворотній зв'язок між вмістом свинцю й потужністю вугільного пласта ($r = -0,95$), тісний прямий зв'язок з кумуляцією марганцю ($r = 0,86$), нікелю ($r = 0,82$), кобальту ($r = 0,85$), хрому ($r = 0,89$), ванадію ($r = 0,92$). Лінійні рівняння регресії:

$$\begin{aligned} Pb &= 0,6722 - 0,7165 \times m; \\ Pb &= 0,0421 + 0,8792 \times Mn; \\ Pb &= 0,1548 + 0,7667 \times Ni; \\ Pb &= -0,0283 + 0,8933 \times Co; \\ Pb &= 0,025 + 0,9435 \times Cr; \\ Pb &= -0,013 + 0,9546 \times V. \end{aligned}$$

Закономірності зміни вмісту фтору. Вміст фтору змінюється у межах від 26,27 г/т до 158,99 г/т. Середнє значення по пласту – 86,93 г/т. Максимальна локація фтору фіксується у південній частині ділянки біля свердловини № Н32086 (рис. 8, а). Кумуляція F не залежить від глибини, вмісту загальної сірки та потужності пласта. Регіональна складова вмісту F зростає у південно-західному напрямку (рис. 8, б) у бік УКЩ.

Встановлено тісний зворотній зв'язок між вмістом фтору і берилієм ($r = -0,91$), тісний прямий зв'язок концентрації F з вмістом золи вугільного пласта ($r = 0,96$). Лінійне рівняння регресії:

$$F = 0,0872 + 0,8501 \times A^d; F = 0,8879 - 0,8646 \times Be.$$

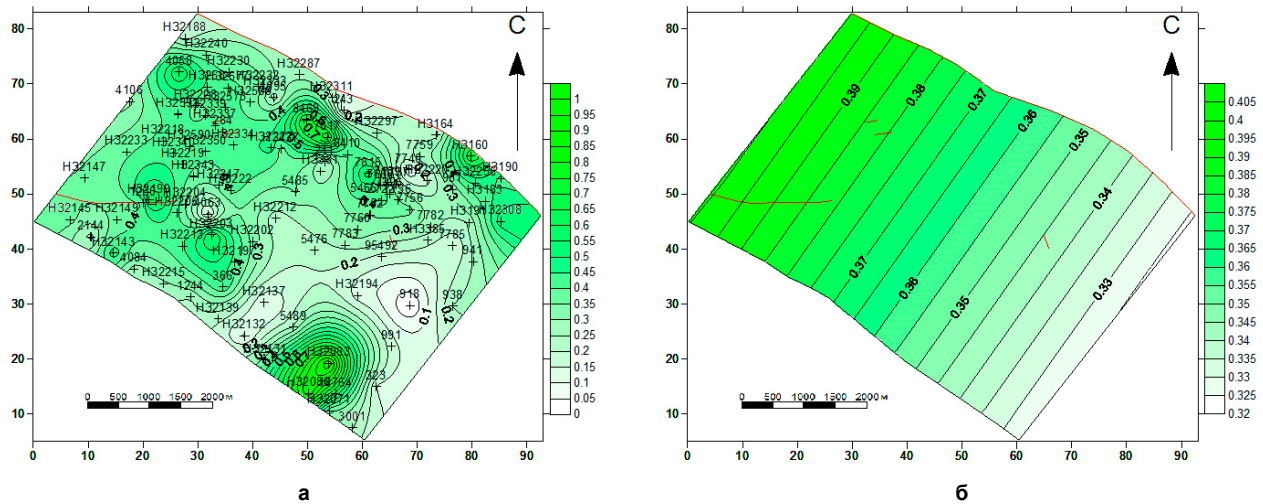


Рис. 6. Карта ізоконцентрат вмісту Hg (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Hg (б) у вугіллі пласта c_8

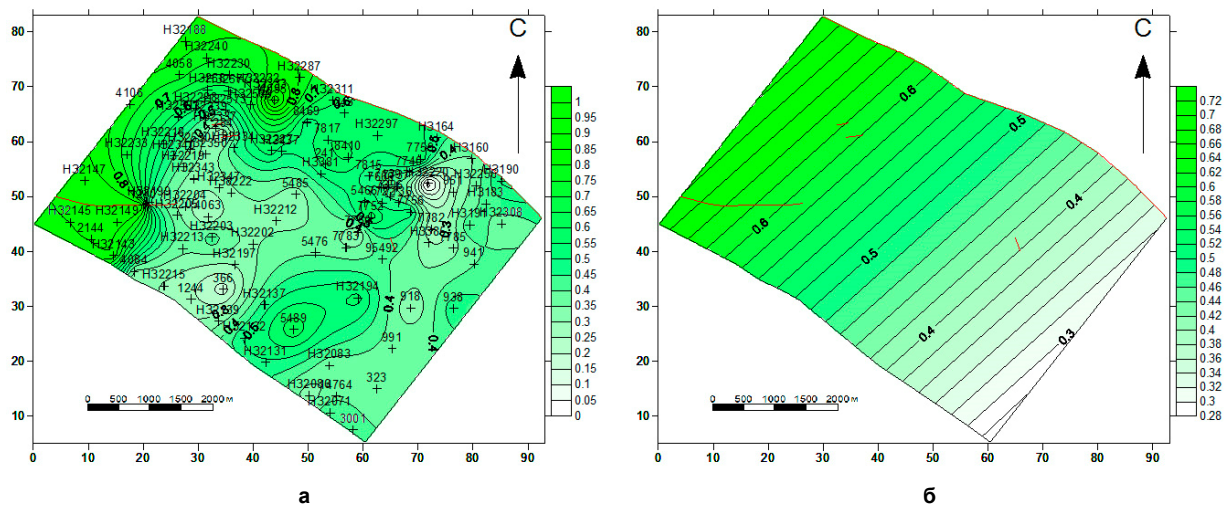


Рис. 7. Карта ізоконцентрат вмісту Pb (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Pb (б) у вугіллі пласта c_8

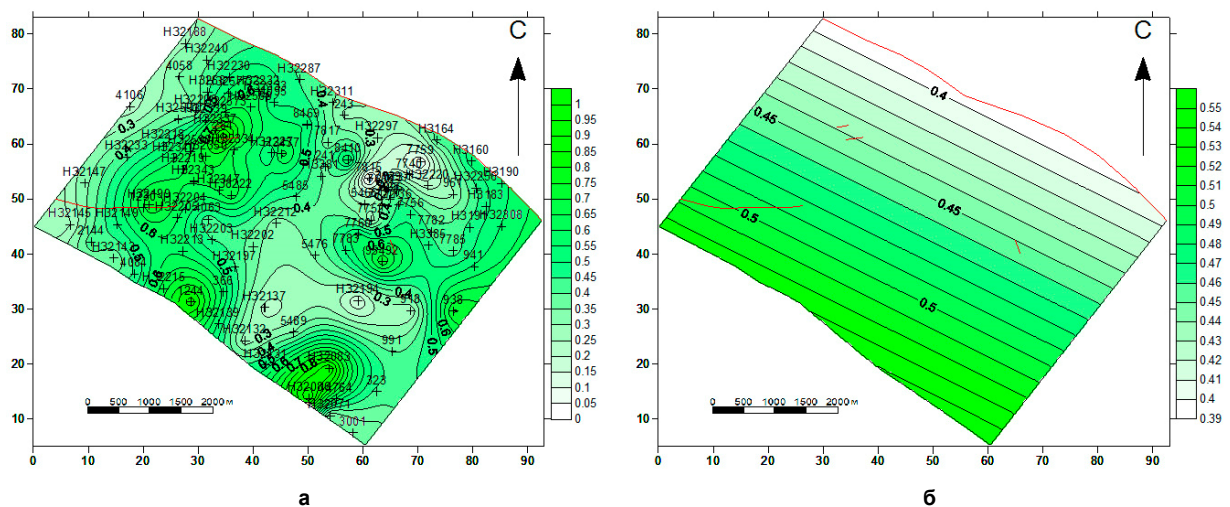


Рис. 8. Карта ізоконцентрат вмісту F (а) та карта зміни регіональної складової концентрації F (б) у вугіллі пласта c_8

Закономірності зміни вмісту хрому. Вміст хрому варіює в межах від 5,33 г/т до 38,56 г/т. Середнє значення по пласту становить 21,68 г/т. Найбільша локація спостерігається у північно-західній частині шахтного

поля на ділянці зі свердловиною № 4095 (рис. 9, а). Концентрація Cr не залежить від глибини, вмісту загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту Cr зростає в північно-західному напрямку (рис. 9, б).

Установлено тісний зворотний зв'язок між вмістом хрому і потужністю вугільного пласта ($r = -0,95$), тісний прямий зв'язок з кумуляцією марганцю ($r = 0,83$), нікелю ($r = 0,84$), свинцю ($r = 0,89$), кобальту ($r = 0,88$), ванадію ($r = 0,90$). Лінійні рівняння регресії:

$$Cr = 0,9262 - 0,893 \times m;$$

$$Cr = 0,0856 + 0,7993 \times Mn;$$

$$Cr = 0,169 + 0,7405 \times Ni;$$

$$Cr = 0,0749 + 0,8526 \times Pb;$$

$$Cr = -0,0136 + 0,8725 \times Co;$$

$$Cr = 0,0233 + 0,8909 \times V.$$

Закономірності зміни вмісту ванадію. Кумуляція ванадію коливається у межах від 1,56 г/т до 27,26 г/т (рис. 10, а). Середнє значення по пласту становить 15,08 г/т. Ділянка з найбільшою локацією V – у північно-західній частині шахтного поля біля свердловини

№ 4095. Вміст V не залежить від глибини, концентрації загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього елемента зростає в північно-західному напрямку (рис. 10, б).

Установлено тісний зворотний зв'язок між вмістом ванадію і потужністю вугільного пласта ($r = -0,93$), тісний прямий зв'язок з концентрацією кобальту ($r = 0,88$), марганцю ($r = 0,85$), свинцю ($r = 0,92$), хрому ($r = 0,90$), нікелю ($r = 0,85$). Лінійні рівняння регресії:

$$V = 0,9747 - 0,9227 \times m;$$

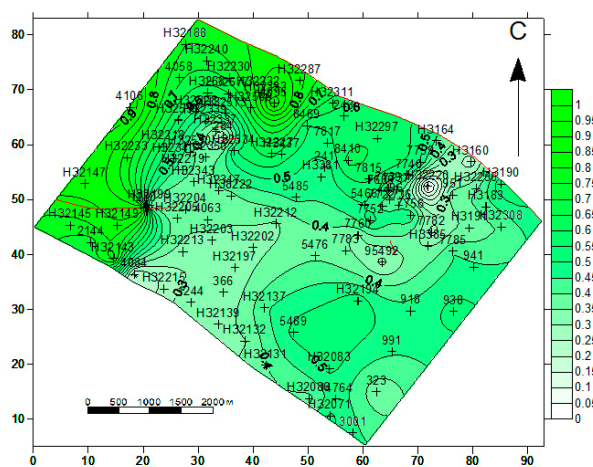
$$V = 0,0141 + 0,8836 \times Co;$$

$$V = 0,102 + 0,834 \times Mn;$$

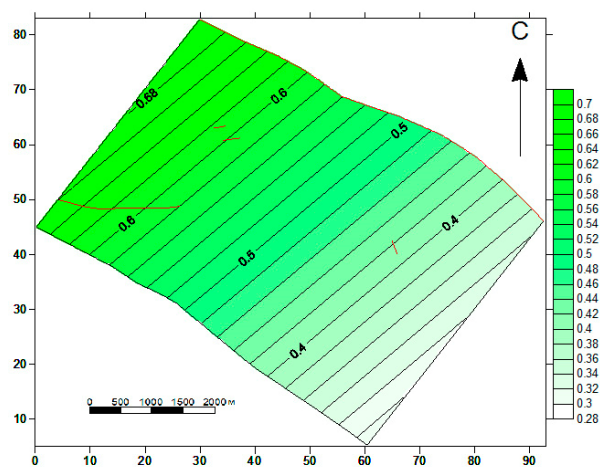
$$V = 0,0918 + 0,8877 \times Pb;$$

$$V = 0,0751 + 0,9166 \times Cr;$$

$$V = 0,1929 + 0,7639 \times Ni.$$

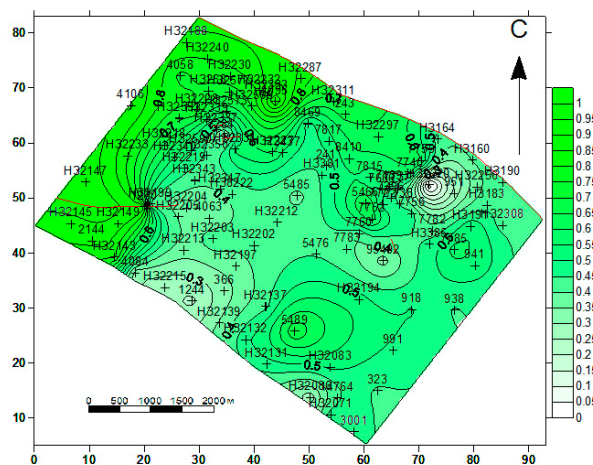


а

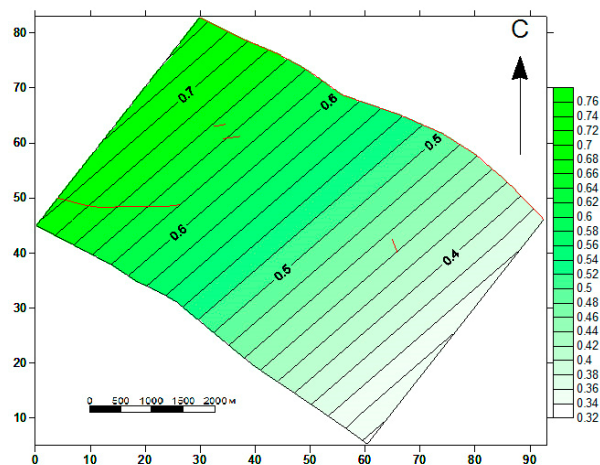


б

Рис. 9. Карта ізоконцентрат вмісту Cr (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Cr (б) у вугіллі пласта с₈^н



а



б

Рис. 10. Карта ізоконцентрат вмісту V (а) та карта зміни регіональної складової концентрації V (б) у вугіллі пласта с₈^н

Висновки. На основі отриманих результатів статистичної обробки геохімічної інформації та аналізу побудованих карт ізоконцентрат ТiПТЕ і карт регіональної складової їхнього вмісту можна сформулювати такі основні висновки:

1. Спільне накопичення Co, Ni, Pb, Cr, V і Mn з утворенням геохімічної асоціації й тісний негативний зв'язок концентрацій цих елементів з потужністю вугільного пла-

ста обумовлені їхнім спільним накопиченням у приконтаткових ділянках пласта з формуванням своєрідних зон збагачення потужністю 0,15–0,2 м.

2. Берилій є єдиним елементом з усіх ТiПТЕ переважно пов'язаним з органічною складовою вугілля пласта.

3. Тісний кореляційний зв'язок асоціації Hg і As з S_{зар.} і аналіз просторового розташування аномалій цих елементів з геолого-структурними особливостями шахтопласта свідчить про накопичення цих елементів на постседиментаційному етапі формування вугленосних

відкладів та їхнього генетичного зв'язку з розривними структурами. Причому якщо великі розривні порушення відігравали в основному роль підвідних і транзитних каналів, то дрібні порушення і особливо оперяючі їх зони тріщинуватості виконували контролюючу функцію.

4. Фтор є єдиним елементом з усіх ТіПТЕ, переважно пов'язаним з мінеральною складовою вугілля пласта.

Основне наукове значення отриманих результатів полягає у встановленні геохімічних асоціацій ТіПТЕ і генетичних причин їхньої мінливості у вугіллі пласта, а також у виявленні полігенного і поліхронного характеру їхнього накопичення.

Практичне значення отриманих результатів полягає в побудові карт ізоконцентрат ТіПТЕ у вугіллі пласта і розрахунку рівнянь регресії між їхнім вмістом і основними технологічними параметрами.

Перспективи подальшого вивчення ТіПТЕ у вугіллі Донбасу полягають у дослідженні розповсюдження цих елементів у вугіллі інших пластів, у тому числі з іншими ступенями вуглефікації та метаморфізму, з метою встановлення особливостей їхнього накопичення і розробки способів і методів як їхнього прогнозу, так і прогнозу технологічних параметрів вугілля, мінливості тріщинуватості й потужності вугільних пластів.

Список використаних джерел

- Горовой, А.Ф. (2001). Геохимия твердых промышленных отходов предприятий Донбасса. *Минералогический журнал*, 4, 136-142.
- Горовой, А.Ф., Горювая, Н.А. (2002). Токсичные элементы в углях шахтных полей угленосных районов Северного Донбасса. *Наукові праці ДонНТУ*, 54, 123-126.
- Дворников, А.Г. (1987). Ртутносность углей Донецкого бассейна. М.: Недра.
- Клер, В. Р. (1982). Инструкция по изучению токсичных компонентов при разведке угольных и сланцевых месторождений. М.: АН СССР, Ин-т литосферы.
- Ишков, В.В., Чернобук, А.И., Михальчонок, Д.Я. (2001). О распределении бериллия, фтора, ванадия, свинца и хрома в продуктах и отходах обогащения Добропольской ЦОФ. *Науковий вісник НГАУ*, 4, 89-90.
- Ишков, В.В., Чернобук, А.И., Дворецкий, В.В. (2001). О распределении бериллия, фтора, ванадия, свинца и хрома в продуктах и отходах обогащения Краснолиманской ЦОФ. *Науковий вісник НГАУ*, 5, 84-86.
- Ишков, В.В. (1999). Проблемы геохимии "малых" и токсичных элементов у вугіллі України. *Науковий вісник НГА України*, 1, 128 - 132.
- Ишков, В.В., Козій, Є.С. (2017). Про розподіл токсичних і потенційно токсичних елементів у вугіллі пласта с7н шахти "Павлоградська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 79, 59-66. doi.org/10.17721/1728-2713.79.09.
- Козій, Є.С. (2018). Миш'як, берилій, фтор і ртуть у вугіллі пласта с8в шахти "Дніпровська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Вісник Дніпропетровського університету. Геологія-Географія*, 26 (1), 113 – 120. doi.org/10.15421/111812.
- Курмельов, І.І. (2013). Тектоническая нарушенность и геохимическая характеристика пород Чистяково – Снежнянского геолого-промышленного района Донбасса. *Науковий вісник НГУ*, 136, 18-22.
- Топливо твердое. (1993). Методы определения мышьяка: ГОСТ 10478-93. Москва: Изд-во стандартов.
- Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. (1975). Метод отбора пластовых проб: ГОСТ 9815-75. Москва: Изд-во стандартов.
- Угли бурые, каменные и антрациты. (1991). Методы определения бериллия, бора, марганца, бария, хрома, никеля, кобальта, свинца, галлия, ванадия, меди, цинка, молибдена, иттрия и лантана: ГОСТ 28974-91. Москва: Изд-во стандартов.
- Godbeer, W.C., Morgan, N.C., Swaine, D.J. (1984). The accession of trace elements to the environs of a power station. *Proc. Eight Int. Clean Air Conf., Melbourne, Clean Air Soc. Aust. and N.Z., Sydney, NSW*, 883-890.
- Martinez-Tarazona, M.R., Spears, D.A., Tascon, J.M.D. (1992). Organic affinity of trace elements in Australian bituminous coals. *Fuel*, 71(9), 909-917.

- Mercer, G.E., Fitzgerald, S., Day, J., Filby, R.H. (1993). Determination of organic/inorganic associations of trace elements in kerogen of the New Albany shale. *Fuel*, 72(11), 1187-1195.
- Pires, M., Teixeira, E.C. (1992). Geochemical distribution of trace elements in lean coal, Brazil. *Fuel*, 71(10), 1093-1096.
- Solari, J.A., Fiedler, H., Schneider, C.L. (1989). Modeling of the distribution of trace elements in coal. *Fuel* 68(5), 536-539.
- Spears, D.A., Martinez-Tarazona, M.R. (1993). Geochemical and mineralogical characteristics of a power station feed-coal. *Eggborough, England, Int. J. Coal Geol.*, 22(1), 1-20.
- Swaine D.J. (1990). Trace Elements in Coal. (M), Butterworth, London.
- Vassilev, S.V. (1994). Trace elements in solid waste products from coal burning at some Bulgarian thermoelectric power station. *Fuel*, 73(3), 367.

References

- Brown coal, hard coal, anthracite and combustible shales. (1975). Method for sampling of seam samples. GOST 9815-75. Moscow: Standartinform Publ. [in Russian]
- Brown coals, hard coals and anthracites. (1991). Methods for determination of beryllium, boron, manganese, barium, chromium, nickel, cobalt, lead, gallium, vanadium, copper, zinc, molybdenum, yttrium and lanthanum. GOST 28974-91. Moscow: Standartinform Publ. [in Russian]
- Dvornikov, A.G. (1987). Mercury content of coal of Donetsk basin. Moscow, Nedra.
- Godbeer, W.C., Morgan, N.C., Swaine, D. J. (1984). The accession of trace elements to the environs of a power station. *Proc. Eight Int. Clean Air Conf., Melbourne*, 883-890.
- Horovoy, A.F. (2001). Geochemistry of Solid Industrial Waste of Enterprises of Donbass. *Mineralogical Journal*, 4, 136-142. [in Russian]
- Horovoy, A.F., Horovaya, N.A. (2002). Toxic elements in coals of mine fields of coal-bearing district of North Donbass. *Scientific Works of DonNTU*, 54, 123-126. [in Russian]
- Ishkov, V.V. (1999). Geochemistry problems of "small" and toxic elements in coal of Ukraine. *Scientific Visnyk NMAU*, 1, 128-132. [in Ukrainian]
- Ishkov, V.V., Chernobuk, A.I., Dvoretzkiy, V.V. (2001). About distribution of beryllium, fluor, vanadium, plumbum and chrome in products and wastes of enrichment of the Krasnolimanskaya CCF. *Scientific Visnyk NMAU*, 5, 84-86. [in Russian]
- Ishkov, V.V., Chernobuk, A.I., Mihalchionok, D.Ya. (2001). About distribution of beryllium, fluor, vanadium, plumbum and chrome in products and wastes of enrichment of the Dobropolskaya CCF. *Scientific Visnyk NMAU*, 4, 89-90. [in Russian]
- Ishkov, V.V., Koziy, E.S. (2017). Distribution of toxic and potentially toxic elements in the coal of the layer c7n of the "Pavlogradskaya" mine of Pavlogradsko-Petrovskiy geological and industrial district. *Visnyk of Taras Shevchenko national university of Kyiv. Geology*, 4(79), 59 – 66. doi.org/10.17721/1728-2713.79.09. [in Ukrainian]
- Kler, V.R. (1982). Instruction for the study of toxic components in the exploration of coal and shale deposits. Moscow: Institute of the lithosphere AS USSR. [in Russian]
- Koziy, E.S. (2018). Arsenic, beryllium, fluorine and mercury in the coal of the layer c8b of the "Dniprovskaya" mine of Pavlogradsko-Petrovskiy geological and industrial district. *Dnipropetrovsk University Bulletin Series-Geology Geography*, 26(1), 113 – 120. doi.org/10.15421/111812. [in Ukrainian]
- Kurmelev, I.I. (2013). Tectonic disturbances and geochemical characteristics of the breed Chistyakov-Snezhnyanskiy geological industrial district of Donbass. *Scientific Bulletin of NMU*, 136, 18-22. [in Ukrainian]
- Martinez-Tarazona, M.R., Spears, D.A., Tascon, J.M.D. (1992). Organic affinity of trace elements in Australian bituminous coals. *Fuel*, 71(9), 909-917.
- Mercer, G.E., Fitzgerald, S., Day, J., Filby, R.H. (1993). Determination of organic/inorganic associations of trace elements in kerogen of the New Albany shale. *Fuel*, 72(11), 1187-1195.
- Pires, M., Teixeira, E.C. (1992). Geochemical distribution of trace elements in lean coal, Brazil. *Fuel*, 71(10), 1093-1096.
- Solari, J.A., Fiedler, H., Schneider, C.L. (1989). Modeling of the distribution of trace elements in coal. *Fuel*, 68(5) 536-539.
- Solid fuel. (1993). Methods for determination of arsenic. GOST 10478-93. Moscow: Standartinform Publ. [in Russian]
- Spears, D.A., Martinez-Tarazona, M.R. (1993). Geochemical and mineralogical characteristics of a power station feed-coal. *Proc. Int. J. Coal Geol., Eggborough, England*, 22(1), 1-20.
- Swaine, D.J. (1990). Trace Elements in Coal. (M), Butterworth, London.
- Vassilev, S.V. (1994). Trace elements in solid waste products from coal burning at some Bulgarian thermoelectric power station. *Fuel*, 73(3), 367.

Надійшла до редколегії 10.08.19

V. Nesterovskiy, Dr. Sci (Geol.), Prof.,
E-mail: v.nesterovski@ukr.net,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
V. Ishkov, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
E-mail: ishwishw37@gmail.com;
Ye. Kozii, Cand. Sci. (Geol.),
E-mail: koziy.es@gmail.com,
Dnipro University of Technology,
19, D. Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine

TOXIC AND POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS IN THE COAL OF THE SEAM C_8^H OF THE "BLAGODATNA" MINE OF PAVLOHRAD-PETROPAVLIVKA GEOLOGICAL AND INDUSTRIAL AREA

Toxic elements in coal are one of the main sources of environmental pollution. Their content in coal is quite high, therefore the modern raising of ecological requirements needs taking into account the influence of coal-mining enterprises on state of environment. This causes the need of new scientifically grounded methods for forecasting the content of toxic and potentially toxic elements (TaPTE) in rock mass, as well as in mining waste and coal enrichment.

In the article, the results of investigations of TaPTE in coal seam C_8^H of "Blagodatna" mine field of Pavlohrad-Petropavlivka geological and industrial area of Donbas are considered, for the purpose of establishing regularities in their spatial distribution. The average content and lateral variations of TaPTE concentrations in coal seam were established, maps of the isoconcentrate of TaPTE and maps of the regional constituent of their contents in the area were constructed. The constructed maps are the factual basis for the long-term forecast of the concentrations of TaPTE in the rock mass extracted from mines. Linear regression equations are calculated, they characterize relationship between the concentrations of toxic and potentially toxic elements and the main technological parameters of the investigated layer. These equations can be used for short-term and medium-term forecasting of TaPTE content in the extracted rock mass. In its turn, such forecasts should serve as the basis for technological solutions aimed at reducing their content in products and waste of coal enrichment.

In addition, analysis of the result of statistical processing of geochemical information and geological and structural characteristics of the seam C_8^H of mine field of "Blagodatna" mine indicates that the formation of the association of Co-Ni-V-Pb-Cr-Mn is associated with the enrichment of contact zones of the coal layer by these elements with thickness of 0,15-0,20m. The association of Hg and As is due to their genetic connection with the sulfide mineralization of fractured zones of tectonic nature.

Keywords: coal seam, coal height, ash, sulfur, toxic and potentially toxic elements, map of isoconcentrate, map of regional component, regression equation.

В. Нестеровский, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: v.nesterovski@ukr.net,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
В. Ишков, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: ishwishw37@gmail.com;
Е. Козий, канд. геол. наук,
E-mail: koziy.es@gmail.com,
Национальный технический университет "Днепропетровская политехника",
пр. Д. Яворницького, 19, г. Днепр, 49005, Украина

ТОКСИЧНЫЕ И ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В УГЛЕ ПЛАСТА C_8^H ШАХТЫ "БЛАГОДАТНАЯ" ПАВЛОГРАДСКО-ПЕТРОПАВЛОВСКОГО ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Токсичные элементы в угле являются одним из основных загрязнителей окружающей среды. Их содержание в угле является достаточно высоким, поэтому современные экологические требования обязывают учитывать влияние угледобывающих предприятий на состояние среды. Это, в свою очередь, обуславливает потребность в новых научно обоснованных методах прогноза содержания токсичных и потенциально токсичных элементов (ТиПТЭ) в горной массе, которая добывается, а также в отходах добычи и углеобогащения.

Рассмотрены результаты исследований ТиПТЭ в угле пласта C_8^H поля шахты "Благodatная" Павлоградско-Петропавловского геолого-промышленного района Донбасса с целью установления закономерностей их пространственного распределения. Установлено среднее содержание и латеральные вариации концентрации ТиПТЭ в угле пласта, построены карты изоконцентрат ТиПТЭ и карты региональной составляющей их содержаний для исследованной площади. Построенные карты являются фактологической основой для долгосрочного прогноза концентраций ТиПТЭ в добываемой шахтой горной массе. Для этого рассчитаны линейные уравнения регрессии, которые характеризуют связь между концентрациями ТиПТЭ и основными технологическими параметрами исследованного пласта. Эти уравнения могут быть использованы для краткосрочного и среднесрочного прогноза содержания ТиПТЭ в добываемой горной массе. В свою очередь такой прогноз должен служить основанием для технологических решений, направленных на снижение содержания ТиПТЭ в продуктах и отходах углеобогащения.

Кроме этого, анализ результатов статистической обработки геохимической информации и геолого-структурной характеристики пласта C_8^H поля шахты "Благodatная" свидетельствует, что формирование ассоциации Co-Ni-V-Pb-Cr-Mn связано с обогащением этими элементами приконтактных зон угольного пласта мощностью 0,15–0,20 м. Доказано, что бериллий является единственным элементом, преимущественно связанным с органической составляющей угля. Ассоциация Hg и As обусловлена их генетической связью с сульфидной минерализацией трещиноватых зон тектонической природы.

Ключевые слова: угольный пласт, мощность, зола, сера, токсичные и потенциально токсичные элементы, карта изоконцентрат, карта региональной составляющей, уравнение регрессии.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04>С. Вижва¹, д-р геол. наук, проф.,E-mail: vsa@univ.net.ua;В. Онищук¹, канд. геол. наук, доц.,E-mail: vitus16@ukr.net;І. Онищук¹, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.,E-mail: oivan1@ukr.net;О. Олійник², головний фахівець сектора інтерпретації даних ГДС,E-mail: orve@ukr.netМ. Рева¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.,E-mail: mvreva@gmail.com;О. Шабатура¹, канд. геол. наук,E-mail: dard@ukr.net;¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна²АТ "Укргазвидобування", Департамент геофізики,
вул. Кудрявська 26/28, м. Київ, 04053, Україна**ФІЛЬТРАЦІЙНО-ЄМНІСНІ ПАРАМЕТРИ НИЖНЬОПЕРМСЬКИХ КАРБОНАТНИХ ПОРІД
ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ГЛИНСЬКО-СОЛОХІВСЬКОГО ГАЗОНАФТОНОСНОГО РАЙОНУ
ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком)*

Висвітлено результати дослідження фільтраційно-ємнісних властивостей нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району Дніпровсько-Донецької западини. Мета досліджень полягала в оцінці перспективності порід, як можливих колекторів вуглеводнів. Досліджувались такі фільтраційно-ємнісні характеристики зразків порід, як коефіцієнт відкритої та ефективної пористості, коефіцієнт проникності та коефіцієнт залишкового водонасичення. На основі капіляриметричних досліджень виконано оцінку структури пустотного простору порід. Вивчається також зв'язок густини порід з їхньою пористістю. Дослідження пористості виконувалося в атмосферних і пластових умовах.

Установлено, що густина сухих зразків порід змінюється від 2212 до 2593 кг/м³ (середнє – 2413 кг/м³), порід, насичених моделлю пластової води – від 2442 до 2626 кг/м³ (середнє 2549 – кг/м³), насичених газом – від 2400 до 2622 кг/м³ (середнє – 2541 кг/м³), уявна мінералогічна густина – від 2718 до 2828 кг/м³ (середнє – 2783 кг/м³).

Коефіцієнт відкритої пористості досліджених порід, насичених моделлю пластової води, змінюється від 0,045 до 0,181 (середнє – 0,127), насичених газом – від 0,049 до 0,184 (середнє – 0,128), насичених азотом (N₂) – від 0,063 до 0,217 (середнє – 0,149). Коефіцієнт ефективної пористості порід варіює в межах від 0,004 до 0,125 (середнє – 0,036), а коефіцієнт залишкового водонасичення – у межах від 0,40 до 0,97 (середнє – 0,79). У результаті моделювання пластових умов установлено, що коефіцієнт пористості змінюється від 0,040 до 0,169 (середнє – 0,118). Через закриття мікротріщин, у результаті навантаження порід під час створення для них пластових умов пористість порід зменшується порівняно з їхньою пористістю в атмосферних умовах. Відносне зниження коефіцієнта пористості різних порід, що переобуваються в однакових пластових умовах, обернено залежне від коефіцієнта їхньої пористості в атмосферних умовах і у змодельованих пластових умовах становить від 1,5 % до 11 % (середнє – 5,3 %).

Капіляриметричними дослідженнями методом центрифугування встановлено, що капілярний простір досліджених порід має таку структуру: вміст надкапілярних пор змінюється від 1 % до 22 % (середнє – 7 %); вміст капілярних пор – від 2 % до 38 % (середнє 14 %); вміст субкапілярних пор – від 40 % до 97 % (середнє 79 %).

За результатами лабораторних вимірювань коефіцієнт проникності для досліджених карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ змінюється від 0,038 фм² до 1,992 фм² (середнє 0,323 фм²).

Виконано класифікацію колекторських властивостей зразків порід за коефіцієнтами пористості, проникності та залишкового водонасичення.

Проведений кореляційний аналіз дозволив отримати ряд емпіричних залежностей між фільтраційно-ємнісними параметрами досліджених порід – густиною, коефіцієнтом пористості, коефіцієнтом проникності та коефіцієнтом залишкового водонасичення.

Ключові слова: фільтраційно-ємнісні параметри, густина, пористість, проникність, залишкове водонасичення, кореляційні залежності, вапняки.

Постановка проблеми. Результати виконаних останнім часом досліджень свідчать, що північно-західна частина Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) є одним із найперспективніших районів на наявність нетрадиційних покладів вуглеводнів (сланцевий газ, газ ущільнених порід, сланцева нафта), які можуть у разі перевищувати ресурси традиційного типу (Михайлов та ін., 2014 а, б). У межах західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ широко розповсюджені карбонатні породи нижньої пермі, які є перспективними на вуглеводні. Зазначені породи представлені слабодопомітними вапняками з малопотужними прошарками піщаних або алевропіщаних вапняків. Характеристика петрофізичних властивостей цих порід є одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ як традиційних, так і нетрадиційних колекторів, що обумовлює актуальність їхнього петрофізичного вивчення.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Вивченню фізичних властивостей порід нафтогазоперспективних районів України присвячена низка публікацій (Вижва та ін., 2010, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017; 2018; Vyzhva, 2017; Карпенко та ін., 2014; Маслов та ін., 2017; Михайлов та ін., 2014 а, б; Нестеренко, 2010; Садівник, 2013; Орлюк та ін., 2011, 2018; Orlyuk, 2018; Федоришин, 2018 та ін.). Значна увага до вивчення петрофізичних характеристик геологічних утворень зумовлена тим, що петрофізичні параметри порід мають важливе значення для оцінки їхніх колекторських властивостей за даними свердловинних електрометричних та акустичних досліджень. Водночас петрофізичні параметри порід і кореляційні залежності між ними мають досить виражений індивідуальний характер стосовно кожної ділянки досліджень. Отже, лабораторне визначення цих властивостей та встановлення відповідних кореляційних зв'язків

між ними для кожної перспективної площі потребують виконання як окремих досліджень, так і окремого публічного висвітлення їхніх результатів.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Проблема пошуків і вивчення традиційних і нетрадиційних джерел вуглеводнів – сланцевого газу, сланцевої нафти, газу ущільнених колекторів та ін. не втрачає своєї актуальності. Для оцінки перспективності на вуглеводні геологічних структур і комплексів, крім економічних і геолого-геометричних параметрів, вмісту органічної речовини й ступеня її термічної переробки, важливе значення мають також петрофізичні властивості гірських порід. Вони використовуються для інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень пошуково-розвідувальних свердловин. Незважаючи на велику кількість публікацій, для ряду порід-колекторів практично відсутні дані результатів їхніх лабораторних фільтраційно-ємнісних, електрометричних, акустичних досліджень та їхніх кореляційних залежностей з фільтраційно-ємнісними параметрами.

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

Коротка петрографічна характеристика. Досліджені нижньопермські породи західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ належать до мікритових, спаритових, мікрито-спаритових і доломітизованих піщаних вапняків. Структура теригенного матеріалу різноманітна, окремі зерна досягають грубого псамітового розміру, а присутній у вапняках пелітоморфний кварц є невід'ємною складовою мікритових різновидів (у тому числі й у спаритах), де він асоціює із глинистою (сметитовою) складовою. Головною ознакою вказаних порід є забарвлення окремих шарів і прошарків, яке контролюється вмістом у них сметитової складової зеленуватого кольору. Виділяються сірі, іноді злегка буруваті спарити, зеленувато-сірі мікрито-спарити, зелені мікрити та світло-сірі їхні різновиди.

Для шарів і прошарків характерні непаралельні, хвилясті, хмароподібні й лінзоподібні межі. Іноді форма лінз має елементи підкручування, які підкреслюються прошарками і ланцюжками, збагаченими піщаним матеріалом та сульфідною мінералізацією.

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

Петрографічні особливості порід дозволяють зробити припущення, що формування карбонатних відкладів відбувалося в середньоглибинній частині шельфу, де осідав планктон, про що свідчать біоморфні рештки, які

становлять основу перекристалізованих спаритових та мікрит-спаритових різновидів. До зони формування тонкозернистих біоморфних карбонатних осадків періодично потрапляє теригенний несортований матеріал (можливо штурміти) або осадки, перенесені придонними течіями, які привносили в більш глибоководні ділянки разом із теригенним матеріалом фрагменти слабо консолідованих (можливо водоростями) сметитових кірочок. Осадки носять трансгресивний характер: знизу вгору по розрізу спостерігається зменшення потужності та кількості теригенних прошарків. В осадах наявні текстури опливання, що формувалися всередині пластів за рахунок неоднорідного літостатичного тиску на діагенетичній стадії після формування кристалів і мікроконкрецій сульфідів. Присутня доломітизація порід має вибіркового характеру: більш інтенсивна – по біоморфних рештках, мінімальна – по кальцитовому мікриту. Можна припустити, що доломітизація вапняків відбувалася на епігенетичній стадії після (або під час) формування кліважної тріщинуватості. Проте додаткова пористість не утворювалася у зв'язку з можливим заліковуванням пор і тріщин сметитом і пелітоморфним карбонатом.

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

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

Методика петрофізичних досліджень. Об'ємна густина досліджених порід у сухому стані визначалася шляхом зважування та вимірювання геометричних розмірів спеціальних лабораторних зразків циліндричної форми, а в насиченому стані – методом гідростатичного зважування за стандартною методикою попередньо насичених зразків (Тиаб і Дональдсон, 2009; Інструкція ..., 1977; Дортман, 1992а, б). Для визначення ваги зразків застосовувалися цифрові аналітичні ваги WPS 360/c/2 (точність $\pm 0,001$ г).

Коефіцієнт відкритої пористості визначався газоволюметричним способом і ваговим методом згідно із стандартною методикою. Зразки гірських порід насичувалися моделлю пластової води – розчином NaCl з мінералізацією 190 г/л та газом і зважувалися цифровими аналітичними вагами WPS 360/c/2. Середня відносна похибка визначень коефіцієнта пористості становила 1,1 %.

Капілярметричні дослідження виконувалися шляхом центрифугування зразків порід за допомогою центрифуги ОС-6М (Породы горные, 1985; Рудько, 2005). Обертова швидкість ротора центрифуги змінювалась від 1000 до 6000 об/хв із кроком 1000 об/хв, при цьому тиск витіснення змінювався від 0,03 до 1,078 МПа.

Для встановлення кореляційного зв'язку між ємнісними, електричними та акустичними параметрами порід в атмосферних і пластових умовах виконано комплекс петрофізичних досліджень із фізичним моделюванням пластових умов (температура $t = 50$ °C; ефективний тиск $p_{\text{ef}} = 30$ МПа; мінералізація $M = 190$ г/л).

Аналіз даних лабораторних досліджень. У результаті виконаних комплексних лабораторних досліджень визначено петрофізичні параметри нижньопермських карбонатних відкладів. Відомості про межі змін і середні

значення петрофізичних параметрів порід, залежно від їхньої літології, наведено у відповідних таблицях.

Густина. Результати лабораторних визначень густини показали, що густина сухих зразків порід змінюється від 2212 кг/м³ до 2593 кг/м³ за середнього значення 2413 кг/м³. Густина порід, насичених моделлю пластової води, варіює у межах від 2442 до 2626 кг/м³ за середнього значення 2549 кг/м³, а насичених газом – від 2400

до 2622 кг/м³, середнє значення – 2541 кг/м³. Уявна мінералогічна густина досліджених порід змінюється від 2718 до 2828 кг/м³, за середнього значення 2783 кг/м³. Відомості про межі змін і середні значення густинних параметрів порід залежно від їхньої літології наведено в табл. 1. Широка межа зміни густини свідчать про мінливість як літологічного складу зразків досліджених порід, так і власне їхньої пористості.

Таблиця 1

Межі змін і середні значення густинних параметрів порід					
Порода	Значення параметра	Густина (сухі), кг/м ³	Густина (насич. газом), кг/м ³	Густина (насич. NaCl), кг/м ³	Уявна густина мінералогічна, кг/м ³
Мікритовий вапняк; спаритовий вапняк; мікрито-спаритовий вапняк; доломітизований піщанистий вапняк	мін.	2212	2400	2442	2718
	макс.	2593	2622	2626	2828
	сер.	2413	2541	2549	2783

Пористість. Пустотний простір породи характеризується пористістю, а здатність породи пропускати через себе флюїди – проникністю. Ці властивості породи для кожного типу флюїду визначають його об'єм, швидкість руху і технологію видобутку. Іншими важливими властивостями порід-колекторів є їхня структура та вміст води (залежно від капілярного тиску), а також звивистість порових каналів. Структура осадових порід значною мірою визначається формою та окатаністю зерен, їхніми розмірами, сортуванням, орієнтуванням і типом упаковки, а також хімічним складом (Тиаб и Доналдсон, 2009; Инструкция ..., 1977; Дортман, 1992 а, б). Комплексне вивчення цих параметрів дозволяє отримати інформацію про діагенетичні й катагенетичні процеси та про механізми, які діяли під час транспортування і відкладення осадового матеріалу, ущільнення та деформації осадків

(Тиаб и Доналдсон, 2009). За структурою породи можна візуально на якісному рівні оцінити ступінь її пористості й проникності. Зміни проникності можна прогнозувати, виходячи із змін розміру і форми частинок, а також розподілу пустотних каналів у породі.

Пористість породи – важливий параметр, який визначає ємність колектора, тобто властивість породи вміщувати флюїди (нафту, газ і воду). Розрізняють загальну, відкриту та ефективну пористість (Тиаб и Доналдсон, 2009; Инструкция ..., 1977; Дортман, 1992 а, б).

Досліджені вапняки загалом характеризуються низькими і середніми значеннями пористості. Відомості про межі змін і середні значення коефіцієнта пористості порід, залежно від їхнього виду наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Межі змін і середні значення ємнісних параметрів порід						
Порода	Значення параметра	Коефіцієнт відкритої пористості, k_p			Коефіцієнт ефективної пористості, k_{pe}	
		насич. азотом	насич. NaCl	насич. газом	насич. NaCl	насич. газом
Мікритовий вапняк; спаритовий вапняк; мікрито-спаритовий вапняк; доломітизований піщанистий вапняк	мін.	0,063	0,045	0,049	0,004	0,008
	макс.	0,217	0,181	0,184	0,125	0,099
	сер.	0,149	0,127	0,128	0,036	0,031

Коефіцієнт відкритої пористості порід, визначений газоволюметричним способом, змінюється від 0,063 до 0,217 за його середнього значення 0,149. Цей параметр, визначений методом насичення вапняків моделлю пластової води (розчином NaCl), змінюється від 0,045 до 0,181 за його середнього значення 0,127, а при насиченні їх газом – від 0,049 до 0,184 при середньому значенні 0,128.

У результаті виконаних досліджень були встановлені кореляційні залежності між коефіцієнтами пористості, визначеними газоволюметричним способом і методом насичення рідиною (розчином NaCl та газом). Отримані кореляційні залежності описуються лінійними функціями:

$$k_{p,NaCl} = 0,816 \cdot k_{p,гв} + 0,0104, \text{ при } R^2 = 0,85;$$

$$k_{p,гв} = 0,8739 \cdot k_{p,NaCl} - 0,0066, \text{ при } R^2 = 0,846,$$

де $k_{p,гв}$, $k_{p,NaCl}$, $k_{p,гв}$ – коефіцієнти відкритої пористості, визначені, відповідно, газоволюметричним способом, насиченням розчином NaCl та насиченням газом. Графіки цих залежностей наведено на рис. 1, 2.

Аналіз отриманих даних дозволив установити кореляційні залежності між густиною досліджених вапняків (σ) та їхніми коефіцієнтами пористості. Отримані кореляційні залежності, графіки яких наведено на рис. 3 і 4, описуються також лінійними функціями:

$$k_{p,NaCl} = -0,0004 \cdot \sigma + 1,2012, \text{ при } R^2 = 0,882;$$

$$k_{p,гв} = -0,0004 \cdot \sigma + 1,2533, \text{ при } R^2 = 0,838.$$

Згідно з існуючою класифікацією порід-колекторів за відкритою пористістю (Дахнов, 1975) був отриманий такий розподіл зразків за їхніми класами: до колекторів III класу із середньою пористістю (10–20 %) належать 92,4 % досліджених зразків порід; до колекторів IV класу з низькою пористістю (5–10 %) – 5,1 % зразків; до колекторів V класу з дуже низькою пористістю (<5 %) – 2,5 % зразків.

Капілярметричні дослідження виконувалися шляхом центрифугування зразків порід за допомогою центрифуги ОС-6М. Обертова швидкість ротора центрифуги змінювалася від 1000 до 6000 об/хв із кроком 1000 об/хв, що забезпечувало зміну тиску витіснення у межах від 0,03 до 1,078 МПа (Породы горные, 1985; Рудько, 2005). Під час лабораторних петрофізичних досліджень коефіцієнти залишкового водонасичення ($k_{зв}$) і газонасичення ($k_{гн}$) та структура пустотного простору визначалися на основі аналізу кривих капілярного тиску (ККТ), отриманих за результатами центрифугування зразків порід. Дані про коефіцієнти залишкового водонасичення і структуру пустотного простору наведено в табл. 3.

На рис. 5 і 6 наведено типові криві капілярного тиску досліджених вапняків з різними фільтраційно-ємнісними властивостями.

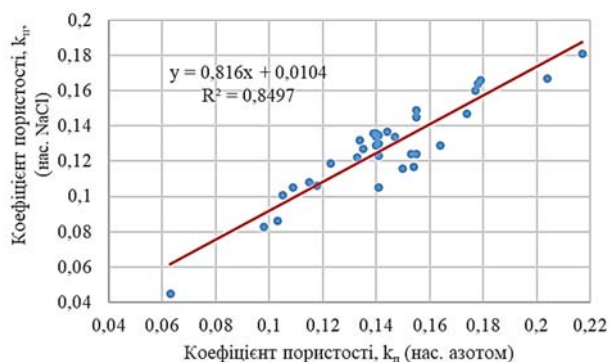


Рис. 1. Залежність між коефіцієнтами відкритої пористості, визначеними газоволюметричним способом ($k_{п,гв}$) і методом насичення розчином NaCl ($k_{п,NaCl}$)

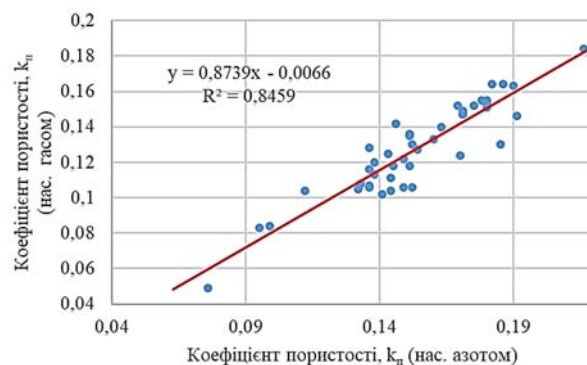


Рис. 2. Залежність між коефіцієнтами відкритої пористості, визначеними газоволюметричним способом ($k_{п,гв}$) і методом насичення газом ($k_{п,гас}$)

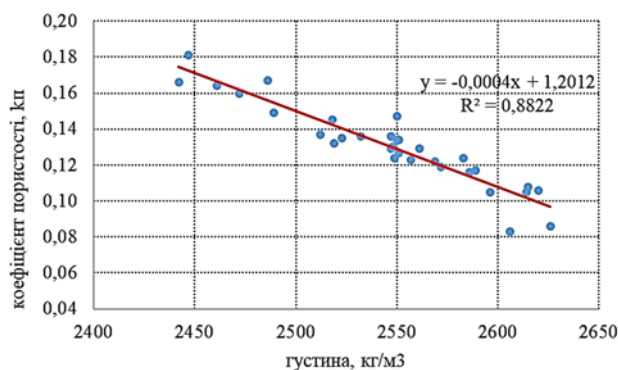


Рис. 3. Залежність коефіцієнта відкритої пористості порід, визначеного методом насичення розчином NaCl, від густини

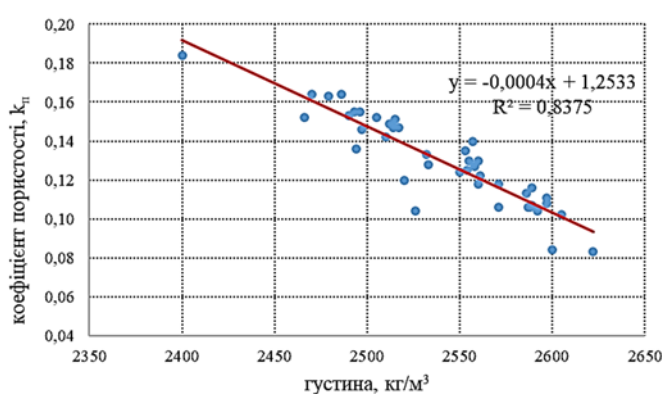


Рис. 4. Залежність коефіцієнта відкритої пористості порід, визначеного методом насичення газом, від густини

Таблиця 3

Межі змін і середні значення параметрів пустотного простору досліджених порід

Порода	Значення параметра	Вміст пор, %			Коефіцієнти залишкового насичення	
		надкапілярні	капілярні	субкапілярні	насич. NaCl, $k_{зв}$	насич. газом, $k_{зп}$
Мікритовий вапняк; спаритовий вапняк; мікрито-спаритовий вапняк; доломітизований піщанистий вапняк	мін.	1	2	40	0,40	0,46
	макс.	22	38	97	0,97	0,92
	сер.	7	14	79	0,79	0,79

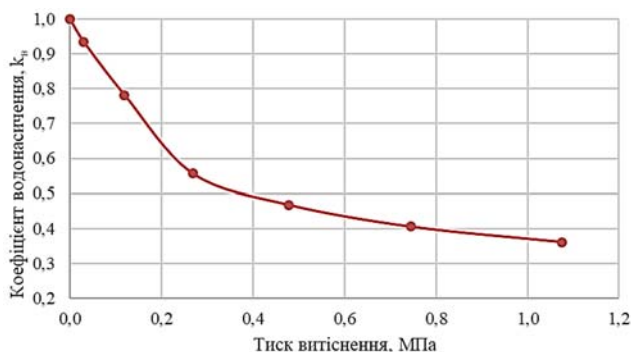


Рис. 5. Типова крива капілярного тиску для вапняків із середніми фільтраційно-ємнісними властивостями

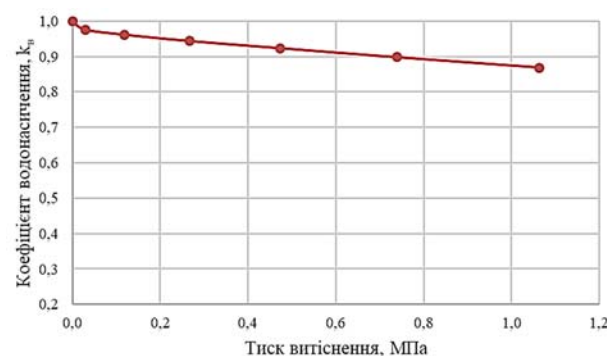


Рис. 6. Типова крива капілярного тиску для вапняків з низькими фільтраційно-ємнісними властивостями

У результаті аналізу лабораторних визначень коефіцієнта залишкового водонасичення верхньопермських вапняків встановлено, що цей параметр змінюється від 0,40 до 0,97 за його середнього значення 0,79. Коефіцієнт залишкового нафтонасичення досліджених порід змінюється від 0,46 до 0,92 за середнього значення 0,77. За визначеними коефіцієнтами залишкового водонасичення порід та існуючою відповідною класифікацією колекторів за класами колекторських властивостей (Дахнов, 1975) досліджені зразки порід відносяться до

III класу колекторів (нафтогазонасичення середнє, $k_{зв} = 0,3-0,5$) – 5,8 % зразків; до IV класу (нафтогазонасичення низьке, $k_{зв} = 0,5-0,7$) – 23 %; до V класу (нафтогазонасичення дуже низьке, $k_{зв} > 0,7$) – 71,2 % зразків.

З використанням коефіцієнтів залишкового водонасичення та нафтонасичення визначено коефіцієнти ефективної пористості ($k_{п,еф}$) досліджених порід. Коефіцієнт ефективної пористості, визначений за залишковим водонасиченням, змінюється від 0,004 до 0,125 за його

середнього значення 0,036, а за залишковим нафтонасиченням – від 0,008 до 0,099 при середньому значенні 0,031.

На основі виконаних петрофізичних досліджень встановлена кореляційна залежність коефіцієнта ефективної пористості від коефіцієнта відкритої пористості. Отримана кореляційна залежність описується поліномом другого порядку:

$$k_{п,еф} = 9,0899 \cdot k_{п}^2 - 1,4008 \cdot k_{п} + 0,055, \text{ при } R^2=0,817.$$

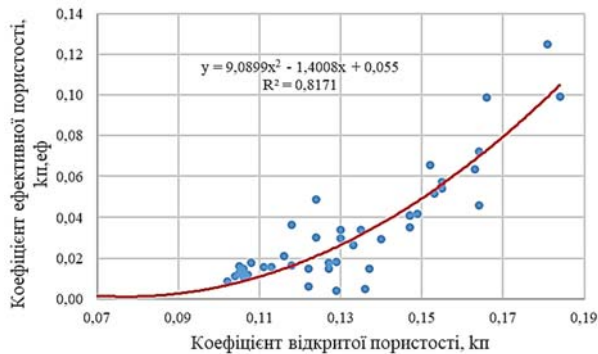


Рис. 7. Залежність коефіцієнта ефективної пористості порід ($k_{п,еф}$) від коефіцієнта відкритої пористості ($k_{п}$)

За результатами досліджень зразків порід було виконано, відповідно до існуючої класифікаційної схеми (Дахнов, 1975), таку їхню класифікацію за ефективною пористістю: до III класу колекторів (ефективна пористість середня, $k_{п,еф} = 5\text{--}15\%$) належить 6,4 % досліджених зразків порід; до IV класу колекторів (ефективна пористість низька, $k_{п,еф} = 3\text{--}7,5\%$) – 40,4 % зразків; до V класу (ефективна пористість дуже низька, $k_{п,еф} < 3\%$) – 53,2 % зразків.

Капілярметричні дослідження з використанням центрифуги дозволили оцінити структуру пустотного простору зразків вапняків за розміром капілярів. Розподіл пустотного простору порід на субкапілярні (діаметр $< 0,2$ мкм), капілярні (діаметр $0,2\text{--}3$ мкм) та надкапілярні (діаметр $3\text{--}100$ мкм) пори (Нестеренко, 2010) наведено в табл. 3.

У надкапілярних і капілярних порових каналах зосереджені флюїди, що можуть брати участь у фільтраційних процесах. Субкапілярні порові канали, як правило, заповнені залишковим водою й участі у фільтрації флюїдів вони не беруть.

За результатами лабораторних капілярметричних досліджень методом центрифугування встановлено, що капілярний простір досліджених порід має таку структуру: вміст надкапілярних пор змінюється від 1 % до 22 % за середнього значення 7 %; вміст капілярних пор –

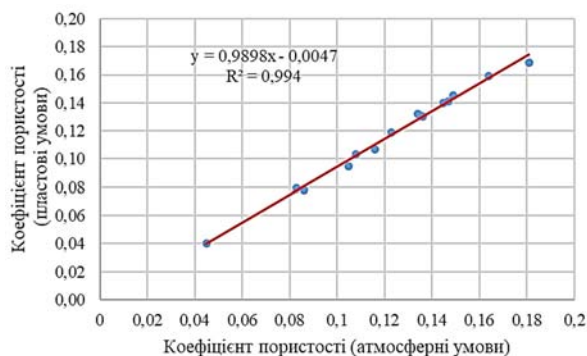


Рис. 9. Кореляційна залежність між коефіцієнтами пористості досліджених вапняків у пластових ($k_{п,пл}$) і атмосферних ($k_{п}$) умовах

Між коефіцієнтом залишкового водонасичення ($k_{зв}$) і коефіцієнтом ефективної пористості порід ($k_{п,еф}$) також отримана кореляційна залежність, яка має лінійний характер:

$$k_{зв} = -5,1265 \cdot k_{п,еф} + 0,9356, \text{ при } R^2=0,845.$$

Графіки цих залежностей наведено на рис. 7 і 8.

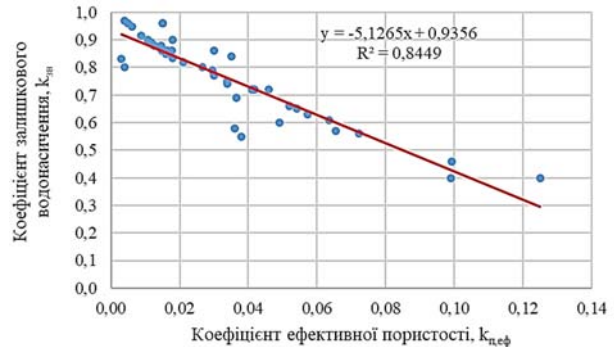


Рис. 8. Залежність коефіцієнта залишкового водонасичення ($k_{зв}$) від коефіцієнта ефективної пористості порід ($k_{п,еф}$)

від 2 % до 38 % за середнього значення 14 %; вміст субкапілярних пор – від 40 % до 97 % за середнього значення 79 % (табл. 3).

Слід відзначити, що за структурою пустотного простору досліджені зразки порід у більшості випадків мають досить низькі фільтраційні властивості, за винятком окремих зразків із середніми фільтраційними параметрами.

Фізичне моделювання пластових умов. Лабораторні вимірювання з використанням установки високого тиску ВСЦ-1000 дозволили оцінити зміну коефіцієнта пористості досліджених порід у пластових умовах, коли насичені розчином NaCl зразки перебували під тиском $p_{еф} = 30$ МПа і при температурі $t = 50^\circ\text{C}$. Для фізичного моделювання пластових умов відібрано 15 зразків з різною пористістю. Аналіз результатів лабораторних досліджень пористості порід у змодельованих пластових умовах показав, що цей параметр для різних вапняків змінюється від 0,040 до 0,169 за середнього значення 0,118. Виконані експериментальні дослідження дозволили також отримати кореляційну залежність між коефіцієнтами пористості в атмосферних ($k_{п}$) і пластових ($k_{п,пл}$) умовах. Ця залежність досить стійка (практично функціональна) і має лінійний вигляд (рис. 9):

$$k_{п,пл} = 0,9898 \cdot k_{п} - 0,0047, \text{ при } R^2 = 0,994.$$

Рис. 10. Залежність відносного зниження (δ) коефіцієнта пористості вапняків ($k_{п,пл}$) у пластових умовах від їхнього коефіцієнта пористості ($k_{п}$) в атмосферних умовах

Унаслідок закриття мікротріщин при навантаженням порід під час моделювання пластових умов пористість порід зменшується порівняно з їхньою пористістю в атмосферних умовах. Аналіз даних показує, що для досліджених карбонатних порід відносне зниження (δ) коефіцієнта пористості при зміні атмосферних умов на пластові становить від 1,5 % до 11 % за середнього значення 5,3 %. Функціональна залежність відносного зниження пористості, що відповідає зазначеній вище кореляційній залежності $K_{п,пл}$ від K_n (рис. 9), має вигляд

$$\delta = (0,0102 + 0,0047 / K_n) \cdot 100 \%$$

і представлена на рис. 10. Із даного співвідношення і наведеного графіка виходить, що відносне зниження коефіцієнта пористості за однакових пластових умов перебуває в оберненій залежності від коефіцієнта пористості в атмосферних умовах. Відтак, виконані дослідження дозволяють дійти висновку, що для високопористих вапняків ($K_n > 0,2$) коефіцієнт пористості в розглянутих вище пластових умовах менший від коефіцієнта пористості в атмосферних умовах не більше ніж на 3 %.

Результати дослідження зразків порід у змодельованих пластових умовах дозволили розрахувати коефіцієнт залишкового водонасичення в пластових умовах ($K_{зв,пл}$). Такі розрахунки виконані з використанням коефіцієнта перерахунку α (ДСТУ 41-00032626-00-025-2000, 2001). Їх результати свідчать, що коефіцієнт залишкового водонасичення різних вапняків у пластових умовах змінюється від 0,42 до 0,99 за його середнього значення 0,81.

Проникність. Властивість породи пропускати флюїди називається проникністю. Проникність породи залежить від її ефективної пористості, отже, на неї впливають розмір зерен породи, їхня форма, просторовий розподіл зерен за розмірами (сортування), а також їхня упаковка, ступінь консолідації й цементації. Тип глинистого або іншого цементувального матеріалу між піщаними зернами також впливає на проникність, особливо в разі присутності води. Деякі глинисті мінерали, зокрема смектит (бентоніти) і монтморилоніт, розбухають у воді й можуть частково або повністю закупорювати пустотний простір (Тиаб і Доналдсон, 2009; Порода горные, 1985).

Абсолютна проникність (коефіцієнт проникності $K_{пр}$) – це параметр, який характеризує проникність породи у випадку, коли вона на 100 % насичена одним флюїдом (фазою), таким як газ ($K_{прг}$), нафта ($K_{прн}$) або вода ($K_{прв}$). У разі присутності в породи більше одного флюїду проникність для кожного з них є фазовою, при цьому коефіцієнти

проникності $K_{прг}$, $K_{прн}$, $K_{прв}$ характеризують ефективну фазову проникність для газу, нафти й води відповідно. Під час руху пустотними каналами пластові флюїди взаємодіють між собою, заважаючи один одному, тому сума ефективної проникності всіх трьох фаз завжди менша абсолютної проникності.

За наявності в породи декількох флюїдів (фаз) відношення ефективної проникності будь-якої фази до абсолютної проникності породи називають відносною проникністю (K_r) для цієї фази (Дахнов, 1975; Тиаб і Доналдсон, 2009). Так, відносні проникності для нафти, газу й води відповідно будуть $K_{rn} = K_{прн}/K_{пр}$, $K_{rg} = K_{прг}/K_{пр}$, $K_{rv} = K_{прв}/K_{пр}$.

Нафтові й газові колектори можуть мати первинну й вторинну проникності. Первинна проникність – це проникність матриці (мінерального каркасу) породи. Вона утворюється під час відкладення й літофікації (консолідації) осадових порід. Вторинна проникність є результатом зміни матриці породи за рахунок ущільнення, цементації, утворення тріщин і вилугування. Ущільнення й цементація зазвичай зменшують проникність, тоді як процеси утворення тріщин і вилугування переважно її збільшують. У деяких породах, особливо в низькопористих карбонатах і аргілітах, саме за рахунок вторинної проникності відбувається основна міграція флюїдів.

Проникність порід-колекторів нафти і газу може змінюватися в діапазоні від 0,1 до 1000 фм², інколи й більше. Якість колектора обумовлена його проникністю, яка ділиться на низьку – $K_{пр} < 1$ фм², задовільну – $K_{пр} = 1–10$ фм², середню – $K_{пр} = 10–50$ фм², високу – $K_{пр} = 50–250$ фм² і дуже високу – $K_{пр} > 250$ фм² (Дахнов, 1975; Тиаб і Доналдсон, 2009). Колектори із проникністю нижче 1 фм² вважаються ущільненими. Така низька проникність зазвичай властива аргілітам, алевролітам, щільним газоносним пісковицям, матриці вапняків. Такі заходи інтенсифікації продуктивних товщ, як гідророзрив і кислотна обробка пласта, підвищують проникність порід і дозволяють вести видобуток углеводнів із колекторів, які раніше вважалися некондиційними.

Під час лабораторних петрофізичних досліджень порід коефіцієнт проникності зразків керна визначався методом стаціонарної фільтрації азоту за допомогою спеціально розробленої установки (Порода горные, 1985). Середня відносна похибка визначень коефіцієнта проникності становила 2,8 %. Його межі змін і середні значення для нижньопермських карбонатних порід наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Межі змін і середні значення проникності порід

Порода	Значення параметра	Коефіцієнт проникності $K_{пр}$, фм ²
Мікритовий вапняк; спаритовий вапняк; мікрито-спаритовий вапняк; доломітизований піщанистий вапняк	мін.	0,038
	макс.	1,992
	сер.	0,323

У результаті аналізу лабораторних визначень коефіцієнта проникності порід установлено, що цей параметр змінюється від 0,038 фм² до 1,992 фм² за його середнього значення 0,323 фм². Згідно з існуючою класифікацією порід-колекторів за їхньою проникністю (Дахнов, 1975) був отриманий такий розподіл досліджених карбонатних порід за цим параметром: до IV класу колекторів (проникність низька, $K_{пр} = 1–10$ фм²) належать 9,2 % зразків порід; до V класу колекторів (проникність дуже низька, $K_{пр} < 1$ фм²) – 90,8 % зразків.

Аналіз результатів лабораторних петрофізичних досліджень зразків порід дозволив отримати ряд кореляційних

залежностей між коефіцієнтами ефективної пористості ($K_{п,еф}$), залишкового водонасичення ($K_{зв}$) та коефіцієнтом проникності ($K_{пр}$). Ці залежності, графіки яких наведені на рис. 11, 12, описуються поліномами другого порядку:

$$K_{пр} = 169,55 \cdot K_{п,еф}^2 + 0,7608 \cdot K_{п,еф} + 0,0407, \\ \text{при } R^2 = 0,819;$$

$$K_{пр} = 8,2977 \cdot K_{зв}^2 - 14,327 \cdot K_{зв} + 6,2583, \\ \text{при } R^2 = 0,759.$$

Водночас варто відмітити, що такі залежності з прийнятними коефіцієнтами кореляції вдається отримати лише для окремих літологічних горизонтів.

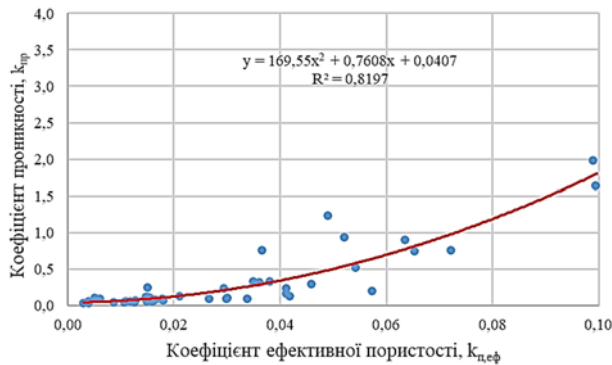


Рис. 11. Залежність коефіцієнта проникності ($k_{пр}$) від коефіцієнта ефективної пористості порід ($k_{эф}$)

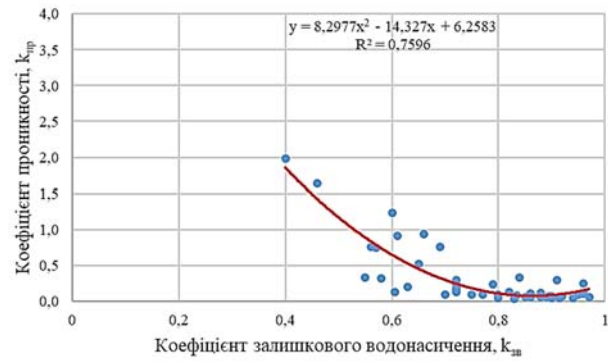


Рис. 12. Залежність коефіцієнта проникності ($k_{пр}$) від коефіцієнта залишкового водонасичення порід ($k_{зв}$)

Висновки. Породи нижньопермської системи західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ належать до мікритових, спаритових, мікрито-спаритових та доломітизованих піщанистих вапняків. Головними ознаками зазначених різновидів вапняків є забарвлення окремих прошарків, яке контролюється вмістом у них смектизованої складової зеленуватого кольору. Виділяються зелені мікрити, сірі, іноді злегка буруваті спарити, зеленувато-сірі мікрито-спарити та світло-сірі їхні різновиди. Слабка проникність різних вапняків пов'язується з наявністю в них павутинної системи міжзернових тріщин, дуже часто виповнених аморфною глинистою колоїдогенною речовиною, або тектонічних тріщин, частково виповнених перевідкладеним мікритом чи кірочками кальциту.

Густина порід сухих зразків змінюється від 2212 до 2593 кг/м³ за середнього значення 2413 кг/м³, порід, насичених моделлю пластової води – від 2442 до 2626 кг/м³ (середнє значення 2549 кг/м³), насичених газом – від 2400 до 2622 кг/м³ (середнє – 2541 кг/м³). Уявна мінералогічна густина досліджених порід змінюється від 2718 до 2828 кг/м³ (середнє – 2783 кг/м³). Широка межа зміни густини досліджених порід свідчать про мінливість їхнього петрографічного складу та пористості.

На основі вимірювання пористості порід газоволюметричним способом встановлено, що їхній коефіцієнт відкритої пористості змінюється від 0,063 до 0,217 (середнє значення 0,149). Пористість досліджених порід, визначена насиченням моделлю пластової води, змінюється від 0,045 до 0,181 (середнє – 0,127), а насиченням газом – від 0,049 до 0,184 (середнє – 0,128). Коефіцієнт ефективної пористості порід варіює в межах від 0,004 до 0,125 (середнє – 0,036), а коефіцієнт залишкового водонасичення – у межах від 0,40 до 0,97 (середнє – 0,79). Кореляційні залежності між густиною порід та їхніми коефіцієнтами пористості, встановлені за результатами лабораторних досліджень, є відносно стійкими й описуються лінійними функціями.

Виконана класифікація порід за відкритою та ефективною пористістю. За цими характеристиками досліджені породи належать до V–III класів колекторів – пористість змінюється від дуже низької до середньої. Встановлено, що за значеннями коефіцієнта відкритої пористості порід до V класу колекторів (пористість дуже низька) належать 2,5 % зразків, до IV класу колекторів (пористість низька) – 5,1 % зразків та до III класу колекторів (пористість середня) – 92,4 % зразків. За ефективною пористістю до V класу колекторів (пористість дуже низька) належать 53,2 % досліджених зразків порід, до IV класу колекторів (пористість низька) – 40,4 % зразків та до III класу колекторів (пористість середня) – 6,4 % зразків.

Визначено, що коефіцієнт залишкового водонасичення карбонатних порід змінюється в межах від 0,40 до

0,97 за середнього значення 0,79. За цим параметром досліджені породи належать до V–III класів колекторів, із них до V класу колекторів (нафтогазонасичення дуже низьке) належать 71,2 % зразків, до IV класу колекторів (нафтогазонасичення низьке) – 23 % зразків та до III класу колекторів (нафтогазонасичення середнє) – 5,8 % зразків.

Структура капілярного простору досліджених порід, отримана за результатами їхнього капілярометричного дослідження методом центрифугування, така: вміст надкапілярних пор змінюється від 1 % до 22 % (середнє значення 7 %); вміст капілярних пор – від 2 % до 38 % (середнє – 14 %), вміст субкапілярних пор – від 40 % до 97 % (середнє – 79 %).

Виконані петрофізичні дослідження показали, що пористість порід у змодельованих пластових умовах змінюється від 0,040 до 0,169 (середнє значення 0,118). Установлена кореляційна залежність між коефіцієнтами пористості, виміряними в атмосферних і пластових умовах способом насичення зразків рідиною, є практично функціональною й описується лінійною функцією. У пластових умовах унаслідок закриття мікротріщин під навантаженням порід їхня пористість зменшується порівняно з пористістю в атмосферних умовах. Відносно зниження коефіцієнта пористості порід, що перебувають в однакових пластових умовах, обернено залежне їхній пористості в атмосферних умовах і для різних зразків порід становить від 1,5 % до 11 % (середнє – 5,3 %). За результатом отриманого кореляційного зв'язку визначено, що для високопористих вапняків ($k_n > 0,2$) коефіцієнт пористості в змодельованих пластових умовах менший від коефіцієнта пористості в атмосферних умовах не більше ніж на 3 %.

Лабораторні вимірювання коефіцієнта проникності порід засвідчили, що цей параметр для різних порід змінюється в межах від 0,038 фм² до 1,992 фм² (середнє – 0,323 фм²). За його значеннями досліджені зразки карбонатних порід належать до V–IV класів колекторів, із них до V класу (проникність дуже низька) – 90,8 % зразків, до IV класу (проникність низька) – 9,2 % зразків.

Слід відзначити, що загалом досліджені вапняки мають переважно низькі фільтраційно-ємнісні властивості, за винятком окремих зразків.

Проведений кореляційний аналіз дозволив отримати ряд емпіричних залежностей між фільтраційно-ємнісними параметрами досліджених порід – густиною, коефіцієнтом пористості, коефіцієнтом проникності та коефіцієнтом залишкового водонасичення.

Автори висловлюють щире подяку старш. лаборанту В.С. Цуману та студентці О.О. Красниковій за їхню активну та високопрофесійну участь в експериментальних дослідженнях.

Список використаних джерел

Вижва С.А., Онищук В.І., Онищук І.І., Рева М.В., Шабатура, О.В. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі

Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 4 (83), 30–37.

Вишва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2013). Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону. *Геоінформатика*, 3 (47), 1–9.

Вишва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2014). Електричні параметри порід-колекторів імпактних структур. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 65, 31–35.

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

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

Вишва, С.А., Рева, М.В., Гожик, А.П., Онищук, В.І., Онищук, І.І. (2010). Петроелектричні дослідження керна складнопобудованих порід-колекторів. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 50, 4–7.

Вишва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, І.І. (2017). Петрофізичні особливості порід майкопської серії Кримсько-Чорноморського регіону. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 79, 12–20.

Дахнов, В.Н. (1975). Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. М.: Недра.

Дортман, Н.Б. (Ред.). (1992а). Петрофизика. Справочник. Ч. 1. М.: Недра.

Дортман, Н.Б. (Ред.). (1992б). Петрофизика. Справочник. Ч. 2. М.: Недра.

ДСТУ 41-00032626-00-025-2000. (2001). Коефіцієнт залишкового водонасичення гірських порід. Методика виконання вимірювань методом центрифугування зразків. Київ: Мінекоресурсів України.

Інструкція по определению емкостных свойств пород в производственных лабораториях министерства геологии УССР. (1977). УкрНИГРИ. Карпенко, О.М., Михайлов, В.А., Карпенко, І.О. (2015). До прогнозу освоєння вуглеводневих ресурсів східної частини ДДЗ. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 68, 49–54.

Маслов, Б.П., Онищук, І.І., Шинкаренко, А.В. (2017). Моделювання нелінійних в'язко-пружних властивостей теригено-вапняковистих пісковиків. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 2, 99–105.

Михайлов, В.А., Вишва, С.А., Загнітко, В.М. та ін. (2014а). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. Кн. IV. Київ: ВПЦ "Київський університет".

Михайлов, В.А., Куровець, І.М., Синьковський, Ю.Н. та ін. (2014б). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Південний нафтогазоносний регіон. Кн. III. Київ: ВПЦ "Київський університет".

Нестеренко, М.Ю. (2010). *Петрофізичні основи обґрунтування флюїдонасичення порід-колекторів*. Київ: УкрДГПР.

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

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

Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В. (2018). Прогноз шляхів проходження та місць накопичення вуглеводнів Чернігівського сегменту Дніпровсько-Донецького авлакогену за геомагнітними даними. *Геофизический журнал*, 40, 2, 123–140. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.12893>.

Породы горные. (1985). Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации: ГОСТ 26450.2-85. Москва: Мингео СССР.

Рудько Г.І. (2005) Обґрунтування кондиційних значень фільтраційно-ємнісних параметрів теригених порід-колекторів для підрахунку запасів вуглеводнів. / Рудько Г.І., Нестеренко М.Ю. та ін. Методичні вказівки. Київ-Львів, 58с.

Садівник, М.І., Федоришин, Д.Д., Трубенко, С.Д., Федоришин, С.Д. (2013). Вплив пластового тиску на електричні параметри гірських порід. *Матеріали XII Міжнародної конференції "Геоінформатика: Теоретичні та прикладні аспекти"*, Київ, Україна.

Тиаб, Д., Дональдсон, Э.Ч. (2009). Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. М.: "Премиум Инжиниринг".

Федоришин, Д.Д., Пятковська, І.О., Трубенко, О.М., Федоришин, С.Д., Трубенко, А.О. (2018). Удосконалення методик виділення порід-колекторів складнопобудованих геологічних розрізів з використанням математичної статистики. *Матеріали XVII конференції "Геоінформатика: Теоретичні та прикладні аспекти"*, Київ, Україна.

Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I. (2018). Physical properties of deep reservoirs of the Glinsko-Solokhivsky oil and gas region. *Матеріали XII Міжнародної наукової конференції "Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища"*, 13-16 листопада 2018 р., Київ, Україна. DOI: 10.3997/2214-4609.201803178

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

Reference

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

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

Dortman, N.B. (Eds.). (1992b). Petrophysics. Handbook. V. 2. Moscow: Nedra. [in Russian]

Fedoryshyn, D. D., Piatkovska, I. O., Trubenko, O. N., Fedoryshyn, S. D. (2018). Improved methods of allocation reservoir rock from complex constructed geological sections by using mathematical statistics. Abstracts of the 17th International Conference "Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects", Kyiv. [in Ukrainian]

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

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

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

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

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

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

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

Rudko G.I., Nesterenko, M.Yu., et al. (2005). Substantiating of the conditioning data of the reservoir parameters of terrigenous reservoirs for calculation of hydrocarbon reserves. Methodology guidelines. Kyiv-Lviv: UkrDHRI.

Sadivnik, M., Fedoryshyn, D., Trubenko, O., Fedoryshyn S. (2013). Influence of Formation Pressure on the Electrical Characteristics of Rocks. Abstracts of the 12th International Conference "Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects", Kiev. [in Ukrainian]

The instruction for determining the storage capacity of rocks in production laboratories of the Ministry of Geology of the Ukrainian SSR. (1977). Lviv: Ukrainian Research Mining Institute. [in Russian]

The rocks. (1985). Methods for determination of reservoir properties. Method for determination of absolute permeability coefficient under stationary and non-stationary filtration (GOST 26450.2–85). Moscow: Mingeo USSR. [in Russian]

Tiab, D., Donaldson, E.C. (2009). Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport. 2th edition. Moscow: Premium Engineering. (Original work published 2004). [in Russian]

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

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

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

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

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

Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onyshchuk, I.I. (2014). Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donets depression promising for shale gas. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36, No 2, 145-157. [in Ukrainian]

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

Vyzhva, S.A., Reva, M.V., Hozhyk, A.P., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, I.I. (2010). Petroelectrical investigations of borehole core of complexly-build reservoir rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 50, 4-7. [in Ukrainian]

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

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

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

Надійшла до редколегії 15.12.19

S. Vyzhva¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhva_s@ukr.net;
V. Onyshchuk¹, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
I. Onyshchuk¹, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: oivan1@ukr.net;
O. Oliinyk², Chief specialist of well logging data interpretation sector,
E-mail: orve@ukr.net
M. Reva¹, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
O. Shabatura¹, PhD (Geol.), Email: dard@ukr.net;
¹Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine
²PJSC "Ukrasvydobuvannya", Department of Geophysics,
26/28 Kudriavskaya St., Kyiv, 04053, Ukraine

LOWER PERMIAN CARBONATE DEPOSITS RESERVOIR PARAMETERS OF WESTERN PART OF HLYNSKO-SOLOHIVSKA AREA OF DNIEPER-DONETS DEPRESSION GAS-OIL-BEARING DISTRICT

The paper concerns the researches of the Lower Permian carbonate deposits reservoir properties of western part of Hlynsko-Solohivska area of gas-oil-bearing district of Dnieper-Donets depression. Such reservoir parameters as the open porosity factor, permeability coefficients and residual water saturation factor have been used to assess the promising rocks for the possible hydrocarbon reservoirs. Void structure of rocks with capillarimetric method and the correlation of rock density with their porosity were also studied. The porosity study was carried out in atmospheric and reservoir conditions.

The bulk density of dry rock samples varies from 2212 kg/m³ to 2593 kg/m³ (mean 2413 kg/m³), water saturated rocks – from 2442 to 2642 kg/m³ (mean 2549 kg/m³), kerosene saturated rocks – from 2400 to 2622 kg/m³ (mean 2541 kg/m³); an apparent specific matrix density – from 2718 to 2828 kg/m³ (mean 2783 kg/m³).

The open porosity coefficient of study rocks, saturated with the synthetic brine, varies from 0.045 to 0.181 (mean 0.127), if samples are saturated with kerosene then it varies from 0.049 to 0.184 (mean 0.128) and when N₂ is used – from 0.063 to 0.217 (mean 0.149). The effective porosity has following values: 0.004-0.125 (0.036), and the residual water saturation factor – 0.4-0.97 (0.79). Analysis of reservoir conditions modeling revealed that porosity coefficient varies from 0.040 to 0.169 (mean 0.118). Due to the closure of microcracks under rock loading reduced to reservoir conditions the porosity decreases in comparison with atmospheric conditions, which causes a relative decrease in the porosity coefficient from 1.5 % to 11 % (mean 9.0 %).

Capillar void of study rocks describes the prevalence of subcapillary pores (40-97 %, mean 79 %) while the overcapillary pores have range 1-22 % (mean 7 %) and the capillary pores – 2-38 % (mean 14 %). The permeability coefficient varies from 0.038 fm² to 1.992 fm² (mean 0.323 fm²).

As result of petropysical researches the rocks have been classified with above mentioned reservoir parameters. The correlation analysis has allowed to establish a series of empirical relationships between the reservoir parameters (density, porosity coefficient, permeability coefficient and residual water saturation factor).

Keywords: filtration-capacitive parameters, density, porosity, permeability, residual water saturation, correlation dependencies, sandstones, carbonates.

С. Выхва¹, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;
В. Онищук¹, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
И. Онищук¹, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: oivan1@ukr.net;
О. Олейник², главный специалист сектора интерпретации данных ГИС,
E-mail: orve@ukr.net
Н. Рева¹, канд. физ.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
А. Шабатура¹, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;
¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина
²АО «Укргаздобыча», Департамент геофизики,
ул. Кудрявская, 26/28, г. Киев, 04053, Украина

ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НИЖНЕПЕРМСКИХ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ГЛИНСКО-СОЛОХИВСКОГО ГАЗОНЕФТЕНОСНОГО РАЙОНА ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ

Рассмотрены результаты исследований фильтрационно-емкостных свойств нижнепермских карбонатных пород западной части Глинско-Солоховского газонефтеносного района Днепровско-Донецкой впадины.

Установлено, что плотность сухих образцов пород изменяется от 2212 до 2593 кг/м³ (среднее значение 2413 кг/м³), насыщенных моделью пластовой воды – от 2442 до 2626 кг/м³ (среднее – 2549 кг/м³), насыщенных керосином – от 2400 до 2622 кг/м³ (среднее – 2541 кг/м³), кажущаяся минералогическая плотность – от 2718 до 2828 кг/м³ (среднее – 2783 кг/м³).

Коэффициент открытой пористости исследованных пород при их насыщении моделью пластовой воды меняется от 0,045 до 0,181 (среднее – 0,127), при насыщении керосином – от 0,049 до 0,184 (среднее – 0,128), а при насыщении N₂ – от 0,063 до 0,217 (среднее – 0,149). Коэффициент эффективной пористости пород изменяется от 0,004 до 0,125 (среднее – 0,036), а коэффициент остаточного водонасыщения варьирует в пределах от 0,40 до 0,97 (среднее 0,79). При моделировании пластовых условий установлено, что коэффициент пористости изменяется от 0,040 до 0,169 (среднее – 0,118). Вследствие закрытия микротрещин при нагрузке пород (приведение к пластовым условиям) пористость уменьшается по сравнению с атмосферными условиями, что вызывает относительное снижение коэффициента пористости при переходе от атмосферных условий к пластовым от 1,5 % до 11 % (среднее – 5,3 %).

Капиллярнометрическими исследованиями методом центрифугирования установлено, что капиллярное пространство исследованных пород имеет следующую структуру: содержание надкапиллярных пор изменяется от 1 % до 22 % (среднее – 7 %), содержание капиллярных пор – от 2 % до 38 % (среднее – 14 %), а содержание субкапиллярных пор – от 40 % до 97 % (среднее – 79 %).

Выполненными исследованиями определено, что коэффициент проницаемости пород изменяется от 0,038 фм² до 1,992 фм² (среднее – 0,323 фм²).

Выполнена классификация коллекторских свойств исследованных образцов по коэффициентам пористости, проницаемости и остаточного водонасыщения.

Проведенный корреляционный анализ позволил получить ряд эмпирических зависимостей между фильтрационно-емкостными параметрами исследованных пород (плотностью, коэффициентом пористости, коэффициентом проницаемости и коэффициентом остаточного водонасыщения).

Ключевые слова: фильтрационно-емкостные параметры, плотность, пористость, проницаемость, остаточное водонасыщение, корреляционные зависимости, известняки.

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.05>О. Меньшов, д-р геол. наук, старш. наук. співроб.,
E-mail: menshov.o@ukr.net,Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

МАГНІТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДНИХ І ТЕХНОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ПРИКЛАДІ ДІЛЯНКИ "ГЛИНКА"

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

Розглядаються результати магнітних досліджень ґрунтів і підстилаючих порід дослідної території поблизу озера Глинка. Роботи проводилися як складова вивчення зсувної небезпеки урбанізованого середовища міської агломерації міста Києва з метою моніторингу природних і техногенних процесів, які впливають на об'єкти критичної інфраструктури. У польових умовах вимірювалася об'ємна магнітна сприйнятливість ґрунтів k (10^{-3} од. СІ) і проводився відбір зразків. У лабораторних умовах було виміряно та розраховано питому магнітну сприйнятливість χ (10^{-8} м³/кг), а також її частотну залежність χ_{FD} (%). Ґрунтовий покрив дослідної ділянки – сирій лісовий з ознаками урбанозему. Магнітні дослідження було проведено в межах двох умовних мікрополігонів на високому зсувонебезпечному березі озера Глинка, а також на протилежному низькому. У межах низького берега було закладено мікрокатену та вертикальний ґрунтовий розріз з метою вивчення генетичних горизонтів ґрунтів. Побудовані полігонні області за магнітними параметрами на основі космознімку завантаженого в систему ArcGIS. Класифікація полігонних областей проведена за параметрами магнітної сприйнятливості та її частотної залежності. Виділено полігон з найвищими значеннями магнітної сприйнятливості ($\chi=54 \times 10^{-8}$ м³/кг) та найнижчим значенням частотної залежності ($\chi_{FD} = 3,6$ %). Це техногенно змінена частина ґрунтів. Ідентифіковано два полігони із подібними значеннями магнітних параметрів: $\chi = 25\text{--}35 \times 10^{-8}$ м³/кг, $\chi_{FD} = 8\text{--}10$ %, які віднесено до умовно чистих ґрунтів. Зафіксовано три полігони (два на низькому березі і один на високому зсувонебезпечному) із середніми значеннями магнітних параметрів: $\chi = 35\text{--}40 \times 10^{-8}$ м³/кг, $\chi_{FD} = 6\text{--}7$ %. У межах вертикального розрізу спостережено перерозподіл генетичних горизонтів, що відбивається у розподілі магнітних параметрів і свідчить про ерозійні процеси. Магнітні властивості ґрунтів рекомендовано враховувати при комплексній інтерпретації з електричною томографією, георадарними вимірюваннями та ГС аналізом даних національної бази зсувів України. Результатом стане розробка оптимального алгоритму моніторингу територій розташування об'єктів критичної інфраструктури.

Ключові слова: критична інфраструктура, природні та техногенні процеси, ґрунти, магнетизм наколишнього середовища, магнітна сприйнятливість, ГС.

Вступ. Серед низки природних і техногенних процесів, що є небезпечними для сталого функціонування об'єктів критичної інфраструктури, слід урахувати зсуви та генетично пов'язані з ними процеси водної ерозії ґрунтового покриву. Останні часто характерні для урбанізованих територій міських агломерацій, у межах яких розташована велика кількість об'єктів критичної інфраструктури. Зрозуміло, що не є винятком столиця України місто Київ (див. постанову КМУ від 23 серпня 2016 р.).

Розглянемо детальніше стан проблеми вивчення небезпечних техногенних і природних процесів, які мають вплив на критичну інфраструктуру урбанізованого середовища. Відзначається (Galbraith and Iuliani, 2019), що оцінка надійності критичної інфраструктури важлива для прийняття правильних управлінських рішень і підвищення рівня надійності. Система критичної інфраструктури є основою сучасної економіки, а її стійкість має важливе значення для добробуту суспільства та сталого розвитку. Оцінка ризиків, що пов'язані із впливом на навколишнє середовище критичної інфраструктури в Європі, також є складним процесом (Karagiannis et al., 2019). Kattel and Aros-Vera (2019) розробили основу для ідентифікації та ранжування об'єктів критичної інфраструктури, щоб максимально повно використовувати систему підтримки об'єктів, від яких залежить нормальне функціонування. За останнє десятиліття захист міської інфраструктури став центром уваги в німецькій політиці безпеки (Monstadt and Schmidt, 2019). Існують численні зовнішні інфраструктурні загрози, наприклад природні катастрофи, терористичні та кібер-атаки. Водночас, важливим є врахування ендегенних ризиків, що виникають унаслідок взаємозалежності інфраструктури. У зв'язку із взаємозалежністю між енергетичною та водонебезпечною інфраструктурою, такі ситуації повинні бути проаналізовані з урахуванням потенційних проблем, спричинених зміною клімату та іншими ризиками (Thompson et al., 2019).

Останнім часом пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки як в Україні, так і у світі є пошук ефективних енергозберігаючих, низьковартісних технологій контролю довкілля (Falshtynskyi et al., 2018; Petlovanyi et al.,

2019). Відповідні завдання постають і у сфері ерозієзнавчих досліджень і вишукувань, пов'язаних з контролем зсувонебезпечних територій. Однією із перших, навіть візуально помітних, ознак формування зсувної небезпеки є присутність ерозійних процесів у першому від поверхні геологічному об'єкті – ґрунтовому покриві. Особливо це помітно в межах територій із високими кутами ухилу, а отже суттєвим впливом водної ерозії. При цьому доцільним є застосування магнітних параметрів ґрунтового покриву для розв'язання згаданих завдань. Розглядаючи ерозійні процеси ґрунтового покриву в контексті зсувної небезпеки територій впливу об'єктів критичної інфраструктури, розглянемо сучасний стан магнітних досліджень у цій сфері. Відзначається (Ding et al., 2020), що багато районів зазнають впливу як вітрової, так і водної ерозії, що призводить до серйозної деградації земель. Магнітна сприйнятливість є ефективним інструментом для кількісного визначення перерозподілу ґрунтів як ознаки зсувної небезпеки. Існуючі методи вимірювання ерозії, як правило, включають закладання ґрунтових розрізів, 3D-лазерне сканування, моніторингові ерозієзнавчі спостереження та заходи. На практиці такі процедури мають деякі обмеження. У роботі (Liu et al., 2019) представлена нова методика *in situ* спостережень, що називається методом виявлення магнітного шару (MLD). Результати дослідних робіт (Barbosa et al., 2019) мали на меті оцінку ефективності вимірювання магнітної сприйнятливості як індикатора факторів еродованості ґрунтів (для моделей USLE та WEPP) на прикладі окисолів з різним вмістом заліза на північному сході штату Сан-Паулу, Бразилія. Ерозія, перерозподіл ґрунтів і накопичення відіграють важливу геоморфологічну та екологічну роль. Ravi et al. (2019) перевірили придатність нової методології, що базується на фіксації металевих частинок, використовуючи просторово-часові вимірювання низькочастотної магнітної сприйнятливості.

Низка сучасних досліджень безпосередньо і нерозривно розглядає потенціал магнітних методів для одночасного виявлення ерозійних і зсувних процесів. Eso et al.

(2019) вивчали, як змінюються магнітні властивості та хімічний елементний склад у ґрунтовому профілі на ділянці зсуву. У межах територій з інтенсивними кліматичними змінами (Ferrer et al., 2019) для розробки превентивних заходів необхідна інформація про ерозію ґрунтів під час потужних опадів.

Дослідження потенціалу магнітних досліджень було розпочато нами на прикладі тестових полігонів ділянок "Ржищев" та "Гребені" як об'єктів зсувонебезпечної критичної інфраструктури (Меньшов, 2019). Частина результатів викладена у звіті (Вишва та ін., 2019). Ці дослідження більшою мірою були спрямовані на ідентифікацію зсувонебезпечних та ерозійних процесів ґрунтового покриву в межах впливу природних процесів на об'єкти критичної інфраструктури.

Метою статті є тестування магнітних методів на об'єктах критичної інфраструктури в межах техногенного впливу. А саме, в умовах урбанізованого середовища центральної частини столичної агломерації міста Києва.

Об'єкти і методи. Як дослідну територію для тестування магнітних методів на об'єктах критичної інфраструктури було обрано ділянку "Глинка". Це озеро в центральній частині міста Києва, навколо нього функціонують різні об'єкти міської інфраструктури, у тому числі розташована міська забудова, а також проводиться будівництво нових об'єктів безпосередньо на відстані декількох метрів від озера. Територія навкруги озера характеризується значущою зсувною небезпекою. На рис. 1, а, б наводиться загальна схема дослідної території та фотознімок під час досліджень.



а



б

Рис. 1. Загальна панорама дослідної ділянки озера Глинка:

а – схематичний план; б – фотознімок під час досліджень

Озеро Глинка розташоване в центрі сучасного Києва, на межі Печерського та Голосіївського районів. Глибина озера близько 10 м. Незважаючи на те, що недалеко від цього місця тече річка Либідь, озеро живиться лише підземними джерелами. Тому вода в озері прозора і прохолодна навіть у літню спеку. Озеро з'явилося на карті Києва на початку XIX ст. під час "будівельної лихоманки". Сама назва озера Глинка вказує на те, що в цьому місці проводився видобуток глини для потреб будівництва.

Дослідження велось на двох протилежних берегах озера. Ділянка зсувної небезпеки розташована на високому березі, у напрямку до метро Дружби Народів. Інший берег навпроти є низьким, розташований в бік до метро Либідська, його висота 1–2 м над рівнем води. Ґрунтовий покрив близький до сірого-лісового і переходить до оглееного на рівні води.

Крім того, у ряді випадків ґрунтовий покрив навкруги озера, особливо в межах високого зсувонебезпечного берега, набуває ознак міського ґрунту – урбанозему (Добровольський, 1997; WRB, 2014). У містах антропогенний вплив стає переважним над природними факторами ґрунтоутворення, формуючи в нових екологічних умовах специфічні типи ґрунтів. При цьому міські ґрунти виконують різні екологічні функції, головні з яких: їхня придатність для вирощування зелених насаджень, здатність адсорбувати у товщі забруднювальні речовини, а також утримувати їх від проникнення у ґрунтові води і від надходження у вигляді пилу в міське повітря. Основною відмінністю міських ґрунтів від зональних є наявність діагностичного горизонту "урбік".

Комплекс магнітних досліджень, який було застосовано нами в межах дослідної ділянки "Глинка", включав

польовий і лабораторний етапи вимірювання та аналізів. У польових умовах було проведено рекогносцирувальні роботи, на основі візуального обстеження визначено найбільш ефективні ділянки для проведення вимірювань і відбору зразків ґрунтів. При цьому бралися до уваги наявні зсувні процеси, техногенне забруднення ґрунтів, можливість відстеження магнітних параметрів уздовж ґрунтознавчих катен, процеси водної ерозії. У польових умовах вимірювалася об'ємна магнітна сприйнятливості κ (10^{-3} од. СІ) за допомогою польового капаметру ПИМВ-М. За системою конверт у цих же точках проводився відбір зразків ґрунтів. Було закладено ґрунтознавчий розріз для дослідження генетичних горизонтів ґрунтів поблизу рівня води. Зрозуміло, що ґрунтовий покрив не був природним за рахунок суттєвого впливу антропогенних чинників. Водночас, вдалося виділити верхні умовно гумусні горизонти та оглеєну підстилаючу суглинисту породу. У лабораторії вимірювалася та розраховувалася питома магнітна сприйнятливості χ (10^{-8} м³/кг) за допомогою капамістка KLY-2. Для розрахунку частотної залежності магнітної сприйнятливості χ_{FD} (%) було виміряно низькочастотну χ_{LF} та високочастотну χ_{HF} магнітні сприйнятливості за допомогою двочастотного магнітометра MS2B. Зауважимо, що під час запланованого наступного етапу досліджень передбачаються магніто-

мінералогічні вимірювання, які включатимуть термомагнітний аналіз, вимірювання параметрів петлі гістерезису, визначення ізотермічної та безгістерезисної (ідеальної) намагніченостей.

Для класифікації зсувонебезпечних та ерозійних процесів ділянки озера Глинка на основі даних про магнітну сприйнятливості та її частотну залежність було застосовано ГІС аналіз за допомогою програми ArcGis.

Результати та їхнє обговорення. Магнітні дослідження проводилися в межах двох протилежних берегів на прикладі умовних мікрополігонів спостережень. У межах полігону 1 на низькому березі (оконтурений синьою лінією на рис. 2) вимірювання магнітної сприйнятливості та відбір зразків ґрунтів для лабораторних досліджень проводився уздовж мікрокатени від умовного вододілу (найвища точка) у напрямку рівня поверхні води (найнижча точка). Загальний вигляд сірого лісового ґрунтового покриву з ознаками техногенного впливу (урбанозем) наведено на рис. 3, а.

Другий мікрополігон спостережень розташований у верхній частині високого берега, де спостерігається зсувний процес (оконтурений червоною лінією на рис. 2). Ділянка засмічена, ґрунтовий покрив має ознаки сірого лісового та урбанозему зі включеннями антропогенних решток. Загальний вигляд ґрунтового покриву наведено на рис. 3, б.

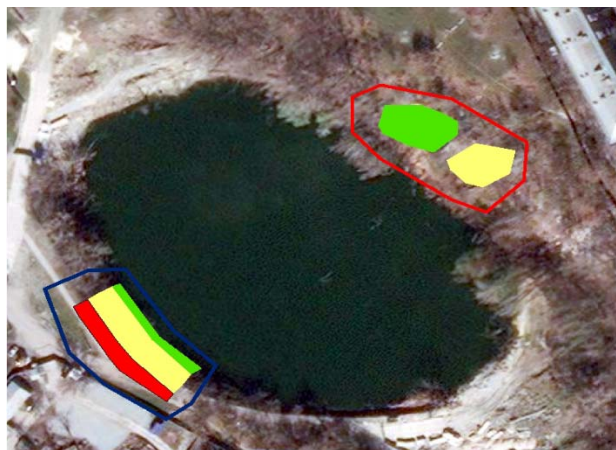


Рис. 2. Магнітна ГІС модель дослідної території "Глинка"



Рис. 3. Вимірювання магнітної сприйнятливості ґрунтів території "Глинка":

а – сірого лісового ґрунту з ознаками урбанозему умовного вододілу низького берега (синє оконтурення на рис. 2); б – сірого лісового ґрунту з ознаками урбанозему умовного вододілу високого зсувонебезпечного берега (червоне оконтурення на рис. 2)

Розглянемо детальніше дані, які наведено на рис. 2. За основу ми використали знімок, завантажений із системи ArcGIS. На ньому проведено класифікацію ґрунтів

території дослідження за магнітною сприйнятливості та її частотною залежністю. Для зазначених вище в тексті мікроділянок за допомогою полігонних об'єктів кольором

показано їх класифікацію. Червоним кольором позначено полігон з найвищими значеннями магнітної сприйнятливості ($\chi = 54 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) та найнижчим значенням частотної залежності ($\chi_{FD} = 3,6 \%$). Це техногенно змінена частина ґрунтів. Зеленим кольором виділено два полігони з подібними значеннями магнітних параметрів: $\chi = 25\text{--}35 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{FD} = 8\text{--}10 \%$. Віднесемо їх до умовно чистих ґрунтів. Жовтий колір характеризує три полігони (два на низькому березі й один на високому зсувонебезпечному) із середніми значеннями магнітних параметрів: $\chi = 35\text{--}40 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{FD} = 6\text{--}7 \%$.

Далі проаналізуємо вертикальні розподіли магнітних параметрів, що наведено на рис. 4. Нами було виділено чотири генетичні горизонти на рівні 0 см, 50 см, 100 см, 150 см. Характеризувати їх з точки зору опису генетичних горизонтів незабруднених сірих лісових ґрунтів у даному випадку не є доцільним за рахунок антропогенного впливу. На рівні поверхневого шару: $\chi = 35 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{FD} = 7,4 \%$. Такі показники можна віднести до фонових як для сірих лісових ґрунтів Київщини (Menshov, 2016). Спостерігається накопичення магнітного матеріалу на глибинах 50 та 150 см. При цьому частотна залежність зростає на фоні доволі низьких значень низькочастотної

магнітної сприйнятливості. Так, для горизонту 50 см зафіксовано значення $\chi = 30 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{FD} = 2,4 \%$, а для горизонту 150 см – $\chi = 22 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{FD} = 3,4 \%$. Дана ситуація пояснюється (особливо для горизонту 150 см) накопиченням техногенних магнітних часток у фонові слабкомагнітних підстилаючих суглинистих породах. Водночас, горизонт 100 см характеризується значеннями $\chi = 44 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{FD} = 6,1 \%$, що є ближчим до фонових магнетизму автоморфних зональних ґрунтів Київщини. Отже, спостерігаємо перерозподіл генетичних горизонтів, що відбивається у розподілі магнітних параметрів і свідчить про ерозійні процеси. Ще раз зауважимо, що в межах дослідної ділянки низького берегу "Глинка" важливим для інтерпретації є те, що MS суглинистих слабкомагнітних генетичних горизонтів поблизу рівня води є доволі низькими, частотна залежність магнітної сприйнятливості також є низькою ($\chi_{FD} = 2\text{--}3 \%$), що вказує на домінування техногенних магнітних мінералів. Вододільні ділянки високого берегу загалом характеризуються вищими (близькими до фонових) значеннями MS ґрунтів, а за χ_{FD} ми відносимо їх до незабруднених. Тому їхні значення MS рекомендуються до врахування при побудові комплексної моделі зсувонебезпечної ділянки "Глинка".

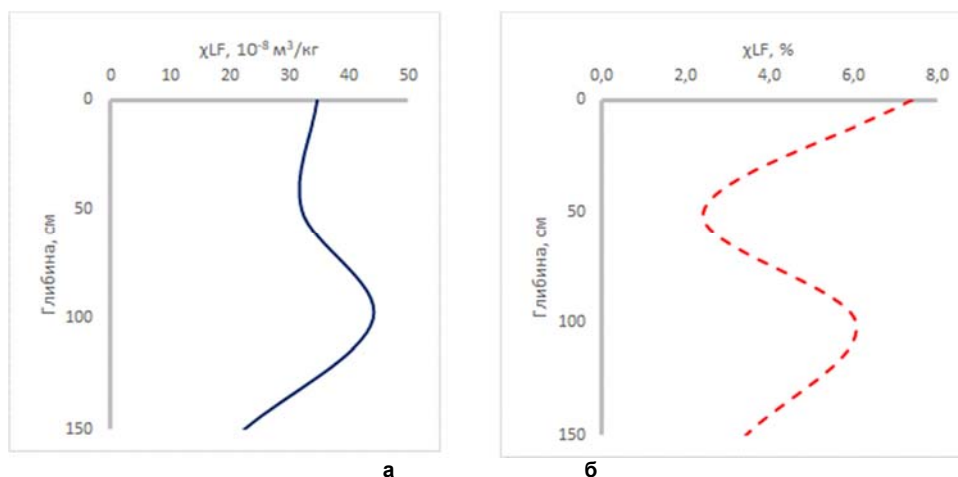


Рис. 4. Вертикальний розподіл магнітних параметрів у межах мікрополігону 1:

а – низькочастотна магнітна сприйнятливості; б – частотна залежність магнітної сприйнятливості

Проінтерпретуємо детальніше описані вище результати з частковим урахуванням магнітної мінералогії ґрунтів. Згідно (Lu et al., 2008) важливим індикатором техногенного походження магнетиків у ґрунтового покритті є розмір їхніх зерен. Так, при переважанні багатодомених (MD) або близьких до них за розміром псевдодомених (PSD) частинок над суперпарамагнітними ультрадисперсними (SP) та стабільними однодоменими (SD) зернами йдеться про присутність техногенного зараження ґрунтів. При цьому інформативним індикатором доменного стану є параметр частотної залежності магнітної сприйнятливості. Найчастіше, якщо $\chi_{FD} < 4 \%$, ґрунти є забрудненими, а превалюють в їхній структурі магнітом'які MD частинки (Wang et al., 2000). Зауважимо, що порогові значення можуть дещо відрізнятися за різними авторами (Evans and Heller, 2003). Більшість магнітних частинок техногенного походження є морфологічно відмінними за розміром зерен, а отже, характеризуються особливою поведінкою магнітних параметрів. Наприклад, летка зола перебуває в діапазоні 20–50 мкм, що відповідає стабільному однодоменому (SD) та мультидоменому стану (MD) із значенням $\chi_{FD} < 2 \%$ (Blundell et al., 2009). Слід зауважити, що причиною низьких значень χ_{FD} ґрунтів може бути й вплив парамагнітного або антиферомагнітного матеріалу, що

генетично пов'язано, наприклад, із процесами заболочування, які викликають відновлення і розчинення феромагнітних зерен. Крім того, при інтерпретації отриманих результатів слід урахувувати й забруднення органічними матеріалами, наприклад поліциклічними ароматичними вуглеводнями, особливо в точках спостережень поблизу автомобільних доріг (Wawer et al., 2015).

Таким чином, нами отримані рекогносцирувальні розподіли магнітних властивостей дослідної ділянки "Глинка". Вони будуть використані при комплексуванні з електричною томографією, георадарними вимірюваннями і даними національної бази зсувів (Іванік та ін., 2019) при подальших дослідженнях та інтерпретації ерозійних процесів, які нерозривно зв'язані із зсувною активністю.

Висновки. Результати магнітних досліджень ґрунтів ділянки "Глинка" як тестового об'єкта зсувної небезпеки в межах урбанізованої території міської агломерації Києва дозволили отримати таку інформацію. Виділено дві полігонні області: низький та протилежний високий береги озера. У межах високого берегу зафіксована зсувонебезпечна ділянка. Проведено вимірювання магнітної сприйнятливості ґрунтів та її частотної залежності по латералі вздовж мікрокатени та вертикалі в умовних генетичних горизонтах. Ґрунтовий покрив визначено як сірий лісовий з ознаками урбанозему. Побудовані

полігонні області за магнітними параметрами на основі космознімку завантаженого в системі ArcGIS. Класифікація полігонних областей проведена за параметрами магнітної сприйнятливості та її частотної залежності. Виділено полігон з найвищими значеннями магнітної сприйнятливості ($\chi = 54 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$) та найнижчим значенням частотної залежності ($\chi_{FD} = 3,6 \%$). Це технологічно змінена частина ґрунтів. Ідентифіковано два полігони з подібними значеннями магнітних параметрів – $\chi = 25\text{--}35 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{FD} = 8\text{--}10 \%$, які віднесено до умовно чистих ґрунтів. Зафіксовано три полігони (два на низькому березі й один на високому зсувонебезпечному) із середніми значеннями магнітних параметрів – $\chi = 35\text{--}40 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_{FD} = 6\text{--}7 \%$. У межах вертикального розрізу спостерігається перерозподіл генетичних горизонтів, що відбивається в розподілі магнітних параметрів і свідчить про ерозійні процеси. Таким чином, нами отримані рекогносцирувальні розподіли магнітних властивостей дослідної ділянки "Глинка". Отримані магнітні характеристики рекомендовано враховувати при комплексній інтерпретації разом з електричною томографією, георадарними вишукуваннями та ГІС аналізом даних національної бази зсувів України з метою розробки оптимального алгоритму моніторингу територій розташування об'єктів критичної інфраструктури.

Підтвердження. Робота виконана в межах держбюджетної теми № 18БП049-01 "Сучасні технології моніторингу природних і природно-техногенних процесів для оцінки впливу на об'єкти критичної інфраструктури".

Список використаних джерел

- Вижва, С., Іванік, О., Шабатура, О. та ін. (2019). Сучасні технології моніторингу природних та природно-техногенних процесів для оцінки впливу на об'єкти критичної інфраструктури. *Звіт з НДР*. Київ.
- Добровольский, Г.В. (Ред.). (1997). Почва, город, экология. Москва: Фонд "За экономическую грамотность".
- Іванік, О., Шевчук, В., Кравченко, Д., Гадяцька, К. (2019). Національна база даних зсувних процесів: принципи розробки, упровадження та застосування для оцінки зсувної небезпеки регіонального та локального рівня. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 86(3), 70-74.
- Меньшов, О. (2019). Інформативність магнітних методів при моніторингу природно-техногенних процесів, які пов'язані з об'єктами критичної інфраструктури. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 84(1), 27-33.
- Barbosa, R.S., Júnior, J.M., Barrón, V., Martins Filho, M.V., Siqueira, D.S., Peluco, R.G., ... Silva, L.S. (2019). Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. *Environmental earth sciences*, 78(1), 12.
- Blundell, A., Hannam, J.A., Dearing, J.A., Boyle, J.F. (2009). Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: A reappraisal using an England and Wales database. *Environmental Pollution*, 157, 2878-2890.
- Ding, Z., Zhang, Z., Li, Y., Zhang, L., & Zhang, K. (2020). Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns. *Soil and Tillage Research*, 199, 104568.
- Eso, R., Bijaksana, S., Ngkoimani, L.O., Agustine, E., Tamuntuan, G., Tufaila, M., ... Usman, I. (2019). Patterns of variation magnetic properties and chemical elements of soil profile in landslide area of South East Sulawesi Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 311, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- Evans, M.E., Heller, F. (2003). *Environmental magnetism. Principles and applications of enviromagnetics*, San Diego: Academic Press.
- Falshytynskyi, V., Saik, P., Lozynskyi, V., Dychkovskiy, R., Petlovanyi, M. (2018). Innovative aspects of underground coal gasification technology in mine conditions. *Mining of Mineral Deposits*, 12(2), 68-75. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.068>
- Galbraith, J.W., Iuliani, L. (2019). Measures of robustness for networked critical infrastructure: An empirical comparison on four electrical grids. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 27, 100326.
- Gaspar Ferrer, L., Lizaga Villuendas, I., Blake, W. H., Latorre Garcés, B., Quijano Gaudes, L., Navas Izquierdo, A. (2019). Fingerprinting changes in source contribution for evaluating soil response during an exceptional rainfall in Spanish Pre-Pyrenees.
- Karagiannis, G.M., Cardarilli, M., Turksezer, Z.I., Spinoni, J., Mentaschi, L., Feyen, L., Krausmann, E. (2019). Climate change and critical infrastructure-storms.
- Kattel, P.J., Aros-Vera, F. (2019). Critical infrastructure location under supporting station dependencies considerations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 100726.
- Liu, L., Zhang, K., Fu, S., Liu, B., Huang, M., Zhang, Z., ... Yu, Y. (2019). Rapid magnetic susceptibility measurement for obtaining superficial soil layer thickness and its erosion monitoring implications. *Geoderma*, 351, 163-173.
- Lu, S.G., Bai, S.Q., Fr, L.X. (2008). Magnetic properties as indicators of Cu and Zn contamination in soils. *Pedosphere*, 18(4), 479-485.
- Menshov, O. I. (2016). Magnetic method applying for the control of productive land degradation. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(4), 130-137.
- Menshov, O. (2019). Application of magnetic methods for the monitoring of the natural and man-made processes associated with critical infrastructure objects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 84, (1), 27-33. [in Ukrainian]
- Monstadt, J., Schmidt, M. (2019). Urban resilience in the making? The governance of critical infrastructures in German cities. *Urban Studies*, 0042098018808483.
- Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskyi, V., Popovych, V., Sai, K., Saik, P. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 24-38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>.
- Ravi, S., Gonzales, H. B., Buynevich, I. V., Li, J., Sankey, J. B., Dukes, D., Wang, G. (2019). On the development of a magnetic susceptibility-based tracer for aeolian sediment transport research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(2), 672-678.
- Thompson, J. R., Frezza, D., Necioglu, B., Cohen, M. L., Hoffman, K., Rosfjord, K. (2019). Interdependent Critical Infrastructure Model (ICIM): An agent-based model of power and water infrastructure. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 24, 144-165.
- Wang, L., Liu, D., Lu, H. (2000). Magnetic susceptibility properties of polluted soils. *Chinese Science Bulletin*, 45, 1723-1726.
- Wawer, M., Magiera, T., Olja, G., Appel, E., Kusza, G., Hu, S., Basavaiah, N. (2015). Traffic-related pollutants in roadside soils of different countries in Europe and Asia. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(7), 216.
- WRB, I. W. G. (2014). World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Report*, 106.

Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskyi, V., Popovych, V., Sai, K., Saik, P. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 24-38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>.

Ravi, S., Gonzales, H.B., Buynovich, I.V., Li, J., Sankey, J.B., Dukes, D., Wang, G. (2019). On the development of a magnetic susceptibility-based tracer for aeolian sediment transport research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(2), 672-678.

Thompson, J. R., Frezza, D., Necioglu, B., Cohen, M. L., Hoffman, K., Rosfjord, K. (2019). Interdependent Critical Infrastructure Model (ICIM): An agent-based model of power and water infrastructure. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 24, 144-165.

Vyzhva, S., Ivanik, O., Shabatura, O. et al. (2019). Modern technologies for the monitoring of the natural and man-made processes for the impact assessment of the critical infrastructure objects. *Report*. Kyiv. [in Ukrainian]

Wang, L., Liu, D., Lu, H. (2000). Magnetic susceptibility properties of polluted soils. *Chinese Science Bulletin*, 45, 1723-1726.

Wawer, M., Magiera, T., Ojha, G., Appel, E., Kusza, G., Hu, S., Basavaiah, N. (2015). Traffic-related pollutants in roadside soils of different countries in Europe and Asia. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(7), 216.

WRB, I. W. G. (2014). World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Report*, 106.

Надійшла до редколегії 25.09.19

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

MAGNETIC STUDIES OF NATURAL AND MAN-MADE PROCESSES OF CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS AT THE AREA "GLINKA"

The results of magnetic soil and underlying rocks studies at the area near Lake Glinka are considered. This study was performed as a part of the landslide investigation of the urban environment of the Kyiv agglomeration. The aim was to detect the natural and man-made processes affecting critical infrastructure. Under field condition we measured the volume magnetic susceptibility of soil κ (10^{-3} SI), and sampling was performed. Under laboratory conditions we measured and then calculated the mass-specific magnetic susceptibility χ (10^{-8} m³/kg), and its frequency dependence χ_{FD} (%). The soil of the study area is gray forest (Greyic Phaeozems Albic in WRB) with signs of urban soil. Magnetic studies were conducted at two points on the high landslide bank of the Lake Glinka, as well as on the opposite low bank. On the low bank, we organised measurements and sampling along the micro-catena and at the vertical soil section to study the soil genetic horizons. Magnetic polygons were constructed based on cosmography downloaded by ArcGIS. The classification of the polygons is made by the attracting the magnetic susceptibility and its frequency dependence. We identified the polygon with the highest values of magnetic susceptibility ($\chi=54 \times 10^{-8}$ m³/kg) and the lowest value of frequency dependence ($\chi_{FD} = 3.6$ %). This is the soil with man-made pollution. Two polygons with similar values of magnetic parameters were identified: $\chi=25-35 \times 10^{-8}$ m³/kg, $\chi_{FD} = 8-10$ %. Such values are related to the natural soils. Three polygons (two on the low bank and one on the high landslide bank of Glinka) have average intensity values of magnetic parameters: $\chi=35-40 \times 10^{-8}$ m³/kg, $\chi_{FD} = 6-7$ %. The vertical distribution of soil magnetic parameters in genetic horizons was observed and the redistribution of magnetic material was detected. Such kind of the redistribution indicates the erosion processes. The magnetic properties of soils are important for the joint interpretation with electric tomography, GPR measurements, and GIS analysis of the national landslide database of Ukraine. The results are useful for the development of the algorithm for the environmental monitoring of the critical infrastructure at the urban area.

Keywords: critical infrastructure, natural and man-made processes, soil, environmental magnetism, magnetic susceptibility, GIS.

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

МАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА "ГЛИНКА"

Рассматриваются результаты магнитных исследований почвы и подстилающих пород тестовой территории вблизи озера Глинка. Работы проводились в рамках изучения оползневой опасности урбанизированной среды городской агломерации города Киева с целью мониторинга природных и техногенных процессов, влияющих на объекты критической инфраструктуры. В полевых условиях измерялась объемная магнитная восприимчивость почвы κ (10^{-3} ед. СИ) и проводился отбор образцов. В лабораторных условиях были измерены и рассчитаны удельная магнитная восприимчивость χ (10^{-8} м³/кг), а также ее частотная зависимость χ_{FD} (%). Почвенный покров данного участка серый лесной с признаками урбанозема. Магнитные исследования проводились в рамках двух условных микрополигонов на высоком оползнеопасном берегу озера Глинка, а также на противоположном низком. В пределах низкого берега были заложены микрокатена и вертикальный почвенный разрез с целью изучения генетических горизонтов почвы. Были построены полигональные области по магнитным параметрам на основе космоснимков загруженных из системы ArcGIS. Классификация полигональных областей проведена по параметрам магнитной восприимчивости и ее частотной зависимости. Выделен полигон с самыми высокими значениями магнитной восприимчивости ($\chi = 54 \times 10^{-8}$ м³/кг) и низким значением частотной зависимости ($\chi_{FD} = 3,6$ %). Это техногенно измененная часть почвенного покрова. Идентифицированы два полигона с близкими значениями магнитных параметров: $\chi = 25-35 \times 10^{-8}$ м³/кг, $\chi_{FD} = 8-10$ %, которые отнесены к условно чистым почвам. Зафиксированы три полигона (два на низком берегу и один на высоком оползнеопасном) со средними значениями магнитных параметров: $\chi = 35-40 \times 10^{-8}$ м³/кг, $\chi_{FD} = 6-7$ %. В пределах вертикального разреза обнаружено перераспределение генетических горизонтов, что, в свою очередь, отражается в величинах магнитных параметров и свидетельствует о присутствии эрозионных процессов. Магнитные свойства почвы рекомендуются учитывать при комплексной интерпретации вместе с электрической томографией, георадарными измерениями и ГИС анализом данных национальной базы оползней Украины. Результатом предложенных работ станет разработка оптимального алгоритма мониторинга территорий расположения объектов критической инфраструктуры.

Ключевые слова: критическая инфраструктура, природные и техногенные процессы, почвы, магнетизм окружающей среды, магнитная восприимчивость, GIS.

УДК 550.8.014+550.8.053

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.06>

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

E-mail: bezin3@ukr.net;

В. Свистов, асп.,

E-mail: wladsvyst@ukr.net;

Д. Безродний, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: manific2@ukr.net;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ АКУСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ПІРОКСЕН-МАГНЕТИТОВИХ ПОРІД ПІЩАНСЬКОЇ СТРУКТУРИ

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Виживою)**Подано аналіз результатів дослідження акустичних властивостей порід Піщанської залізорудної структури.**Метою роботи є встановлення особливостей розподілу акустичних властивостей та параметрів акустичної анізотропії в зразках порід керна, відібраного зі свердловини № 3 Піщанської структури для визначення природи її виникнення.**Вибірка із 35 зразків з інтервалу глибин 144–273 м розділена на 3 групи порід, а саме: магнетит-піроксенові, кварц-магнетит-піроксенові та біотит-амфіболові кристалічні сланці.**Здійснено ряд петроакустичних лабораторних вимірювань на зразках порід у формі куборомбододаєдра з використанням інваріантно-поляризаційного методу. Значення вимірюваних фазових швидкостей "квазіпоздовжньої" та двох "квазіпоперечних" хвиль ще на етапі вимірювань показали суттєву акустичну анізотропію порід. Діапазони вимірюваних швидкостей зразків колекції становлять 7661 ± 5046 м/с для поздовжніх хвиль і 4232 ± 2648 м/с для поперечних. Різниця значень вимірюваних для кожної із пар граней куборомбододаєдра становить від 100 до 800 м/с для V_p та від 0 до 500 м/с – для V_s .**Розраховано параметри акустичного еліпсоїда, за співвідношеннями яких здійснено поділ зразків на три основні групи за акустичною текстурою: акустично лінійна, сланцювата та ромбічна.**Проведено аналіз коефіцієнтів анізотропії за результатами вимірювання швидкостей хвиль: поздовжньої та відносної акустичної анізотропії. Більшості зразків притаманний низький або середній рівень акустичної анізотропії (від 2 до 7 %). Виокремлено групу високоанізотропних порід (11–14 %), що представлені зразками біотит-амфіболових кристалосланців.**За параметрами акустичного тензора більшості зразків притаманний поперечно-ізотропний тип симетрії, що властивий зразкам з інтервалів глибин 174–220 м та 222–232 м, меншій частині – ромбічний. Розбіжності за параметрами анізотропії зразків можна пояснити суттєвою неоднорідністю їхніх текстур, а саме: мікротріщинами, мінералами різного розміру, формами та орієнтації.**Результати досліджень показують, що акустичні властивості зразків відрізняються вздовж інтервалу глибин, що досліджувався. Це пов'язано з різним мінералогічним складом порід, а також свідчить про складні умови утворення порід на різних глибинах і присутність різних типів деформацій, що супроводжували формування Піщанської структури.**Ключові слова: акустична анізотропія, текстура, симетрія, тензор.*

Вступ. Дослідження швидкісних властивостей гірських порід і подальший аналіз природи акустичної анізотропії в різних генетичних типах гірських порід дозволяє встановити причини виникнення явищ неоднорідності фізичних властивостей. Такими чинниками можуть бути мінеральний склад, кристалографічна орієнтація зерен мінералів, форма та орієнтація мікротріщин і пор, тонка шаруватість, напружений стан, вплив на середовище фізичних полів та ін. Саме глибоке дослідження цієї проблематики і подальше вдосконалення апаратури та методики вимірювання акустичної анізотропії відкриває великі можливості для визначення внутрішньої будови гірських порід, встановлення геологічних чинників, що сприяли їхньому формуванню.

Стан проблеми. Протягом усієї історії досліджень анізотропії швидкісних властивостей гірських порід розроблено низку підходів і значну методологічну базу їхньої детермінації, подальшого аналізу та пояснення кристалічної, тектонічної й літологічної причин виникнення даного явища. Дослідження акустичної анізотропії нерозривно пов'язані з пружною анізотропією, що і знаходить своє відображення в особливостях методів. Дослідженням та розробкою теоретичних на методологічних аспектів вивчення акустичних властивостей гірських порід займалися такі вчені, як К.С. Александров, В. Бабушка, І.М. Безродна, Д.А. Безродний, Т.В. Берч, С.А. Вижива, Ф.Ф. Горбачевич, Г. Керн, Т. Локайчек, Г.Т. Продайвода, З. Прос, Ф. Рижова, Т. Світек, Є.Б. Черепецька та ін.

Більшість методів мають спільне підґрунтя та базуються на тензорному аналізі акустичних параметрів. Вибір апаратури та методології досліджень залежить від поставлених завдань та особливостей об'єкта вивчення, зокрема, достатня кількість матеріалів, наявність апріорної інформа-

ції тощо (Александров і Продайвода, 2000). Отже, тому основні методи дослідження можна розділити за кількома характеристиками, а саме – за типом хвиль, що досліджуються, за різним рівнем вивчення акустичної анізотропії та набором компонентів, що визначаються.

Зокрема, метод сфер (Pros and Babuska, 1967), що на момент свого започаткування дозволяв визначати лише розподіл поздовжніх хвиль у зразках, нині продовжує розвиватись і вдосконалюватись. Останні модифікації дозволяють детально оцінити анізотропію пружних хвиль за рахунок вимірювання 3D розподілу квазіпоздовжніх і квазіпоперечних хвиль у зразках за 132 напрямками. Ще однією перевагою даного методу є можливість здійснення досліджень параметрів акустичної анізотропії в умовах гідростатичного тиску. Так, у роботах (Lokajček et al, 2014; Svitek et al, 2014) наведено результати комбінованого вивчення неоднорідностей гірських порід з додатковим застосуванням термоакустичної установки (Kern et al, 1997), а також методу нейтронної дифракції (Соболев и Никитин, 2001).

Акустополяризаційний метод (Горбачевич, 2002) широко використовується для визначення анізотропії акустичних властивостей матеріалів, кількості та орієнтації елементів пружної симетрії, проте також дозволяє встановлювати лінійну акустичну анізотропію поглинання та загальну оцінку неоднорідностей зразків гірських порід. Ще однією особливістю даного методу є можливість встановлення окремо узагальнених коефіцієнтів анізотропії поздовжніх та поперечних хвиль (Тришина та ін. 2007; Горбачевич та ін, 2017; Ковалевский та ін. 2012). Проте здійснення вимірів тільки у трьох основних напрямках робить оцінку акустичних властивостей досить приблизною.

Існує також низка методів, що застосовуються в методах неруйнівного контролю матеріалів (дефектоскопія)

і дозволяють установлювати неоднорідності розподілу фізичних властивостей гірських порід і мінералів (Grishchenko et al., 2017). На думку авторів, варто виокремити метод лазерної ультразвукової стереоскопії, що дозволяє здійснювати оцінку анізотропії гірських порід через функції частотних залежностей коефіцієнта затухання та швидкостей пружних хвиль для трьох взаємно перпендикулярних напрямків. Проте даний метод більше підходить для дрібнозернистих порід, оскільки існує низка вимог до співвідношень довжини хвилі, геометричних розмірів зерен мінералів: адже точність вимірів у цьому методі сильно залежить від можливого розсіювання сигналу від бокових стінок зразка та неоднорідностей (Черепецкая, 2005; Лысенко, 2013).

Досить часто при проведенні досліджень пружних та акустичних властивостей як суміжний метод оцінки текстур гірських порід та їхньої акустичної анізотропії застосовують нейтронну дифракцію (Іванкіна та др., 2004; Іванкіна et al., 2005). Даний метод характеризується високою проникністю нейтронного потоку та низькою абсорбцією нейтронів для більшості елементів, що дає змогу отримувати значення високої точності.

Значно детальнішим та інформативнішим є інваріантно-поляризаційний метод (Александров та Продайвода, 2000; Продайвода та ін., 2011), який дозволяє за відсутності апріорної інформації про симетрію гірської породи та за довільної орієнтації лабораторної системи координат детально встановити просторовий розподіл акустичних властивостей і оцінити середньоквадратичний коефіцієнт акустичної анізотропії та її інші параметри, що розраховуються за результатами визначення квазіпоздовжніх і двох квазіпоперечних фазових швидкостей у дев'яти напрямках. Даний метод застосовується як для досліджень осадових (Вижева та ін., 2018), так і для кристалічних порід (Безродний та ін., 2014).

Метою роботи є встановлення особливостей розподілу акустичних властивостей та параметрів акустичної анізотропії в зразках порід керна, відібраного зі свердловини № 3 Піщанської структури для визначення природи її утворення.

Опис об'єкта досліджень. У даній роботі проведено аналіз 35 зразків керна піроксен-магнетитових кристалосланців відібраних зі свердловини № 3 Піщанської структури в інтервалі глибин 144–273 м.

Піщанська структура розташована на північній околиці с. Піщане Балтського району Одеської області. Даний геологічний об'єкт внесений до списку геофізичних феноменів України. За результатами попередніх досліджень прогнозні ресурси магнетитових руд до відміток 500 м становлять близько 100 млн т, а за результатами технологічних випробувань встановлено, що з даних руд можна отримати металізовані окатиші (88,8 % вмісту заліза), що йдуть на виготовлення високоякісних марок сталі (Ентин, 2012).

На основі петрографічного опису виготовлених у ННІ "Інститут геології" 25 шліфів основних петрографічних різновидів порід, авторами проведено аналіз їхнього мінералогічного складу та структурно-текстурних особливостей. За петрографічними даними колекція зразків була поділена на три групи, зокрема:

1. Магнетит-піроксенові кристалічні сланці (19 зразків: ПС-7, ПС-13 – ПС-23, ПС-29 – ПС-35). Група порід складена, в основному, мінералами піроксену (60–91 %) та магнетиту (7–40 %), з незначними вкрапленнями кварцу та плагіоклазу (до 2 %). Текстури шліфів порід переважно однорідні та смугасто шаруваті, у трьох зразків – брекчієподібні. Структура зразків кристалозерниста, дрібно- та середньозерниста, окремі зразки є різнозернистими.

Розмір зерен змінюється від 0,15 до 6 мм, а форма – від ізометричної до сильно видовженої.

2. Кварц-магнетит-піроксенові кристалічні сланці (12 зразків: ПС-2 – ПС-3, ПС-5, ПС-8 – ПС-9, ПС-11, ПС-12, ПС-24 – ПС-28). Породи складені піроксеном (29–86 %), магнетитом (10–27 %) та зернами кварцу/плагіоклазу (1–57 %). Текстура більшості зразків сланцювата, смугасто-сланцювата, у двох шліфах – брекчієподібна та однорідна. У структурному плані переважають різнозернисті зразки, також зустрічається дрібно-середньозернисті структури із зернами 0,1–5 мм.

3. Біотит-амфіболові кристалічні сланці (чотири зразки: ПС-1, ПС-4, ПС-6, ПС-10). Для даної групи притаманна лінійно-сланцювата текстура та середня зернистість з розмірами зерен від 0,35 до 1,9 мм, із вмістом амфіболу та біотиту від 37 до 63 % та кварцу з плагіоклазом від 36 до 63 %, з незначним вмістом магнетиту, графіту, титаніту та апатиту (до 4 % загалом).

Проведені попередні петромагнітні дослідження колекції зразків (Bezrodnyi et al., 2018) дозволили припустити, що структура магнетиту в породах не є однорідною, його зерна в породи містять певну кількість гематиту; дані дозволяють стверджувати про наявність частки маґеміту, яка становить у середньому від 2–3 % до понад 10 %.

Методика. Авторами в петрофізичній лабораторії ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка за допомогою ультразвукової установки "Керн-4" були проведені лабораторні вимірювання швидкостей пружних хвиль зразків. На основі методики інваріантно-поляризаційного метода (Продайвода та ін., 2011) зразки, що мають форму кубоборомбододекаєдрів, досліджувалися в дев'яти напрямках, в яких були виміряні фазові швидкості трьох пружних хвиль (квазіпоздовжньої, "швидкої" й "повільної" квазіпоперечних хвиль). За результатами вимірювань зразків проведено кількісну оцінку їхньої акустичної анізотропії, здійснено аналіз і порівняння отриманих даних.

На основі вимірюваних швидкостей квазіпоздовжньої та квазіпоперечних хвиль були розраховані (Продайвода та ін., 2011):

- параметри акустичного тензора μ_{ij} , що визначається з величин швидкостей пружних хвиль;
- коефіцієнт відносної середньоквадратичної акустичної анізотропії (A_μ):

$$A_\mu = \sqrt{\frac{\frac{1}{3}[(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + (\mu_{11} - \mu_{33})^2 + (\mu_{22} - \mu_{33})^2]}{(\mu_{ii}^2)_c}} \cdot 100\%,$$

де $(\mu_{ii}^2)_c = \mu_{11}^2 + \mu_{22}^2 + \mu_{33}^2$; $\mu_{11}^2, \mu_{22}^2, \mu_{33}^2$ – власні значення акустичного тензора;

- параметри акустичного еліпсоїду: акустична лінійність $L_a = \mu_0 / \mu_m$ та акустична сланцюватість $S_a = \mu_m / \mu_p$ (тут μ_0, μ_m, μ_p – відповідно найбільше, проміжне та найменше власні значення акустичного тензора).

Класифікацію текстур здійснено за симетрією акустичного тензора μ_{ij} (Продайвода та ін., 2011):

- сферична симетрія, якщо виконується рівність $\mu_{11} = \mu_{22} = \mu_{33}$;
- поперечно-ізоотропна симетрія, якщо виконується одна з умов $\mu_{11} \neq \mu_{22} = \mu_{33}$; або $\mu_{11} = \mu_{22} \neq \mu_{33}$; або $\mu_{11} \neq \mu_{33} = \mu_{22}$;
- ромбічна симетрія, якщо виконується умова $\mu_{11} \neq \mu_{22} \neq \mu_{33}$.

Окремо здійснено спробу порівняння визначення коефіцієнтів акустичної анізотропії за методикою інваріантно-поляризаційного та акустополіаризаційного методів. Зокрема, останній метод передбачає розрахунок

двох коефіцієнтів анізотропії на основі результатів вивчення швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль, виміряних на зразках кубічної форми у трьох напрямках.

Коефіцієнт анізотропії поздовжніх хвиль розраховувався за формулою (Горбачевич, 2002)

$$A_p = \frac{1}{V_{cp}} \sqrt{(V_1 - V_{cp})^2 + (V_2 - V_{cp})^2 + (V_3 - V_{cp})^2},$$

де $V_{cp} = (V_1 + V_2 + V_3)/3$, а V_1, V_2, V_3 – швидкості розповсюдження поздовжніх коливань, що виміряні за трьома основними гранями зразків.

Результати. На основі наявних матеріалів і спираючись на методику інваріантно-поляризаційного та акустополаризаційного методів, авторами було досліджено та проаналізовано ряд акустичних параметрів зразків, зокрема і параметрів акустичної анізотропії.

Яскраво виражена неоднорідність порід проявилась ще на етапі ультразвукових досліджень. Установлено, що значення швидкостей пружних хвиль змінюються залежно від мінерального складу та структурно-текстурних

особливостей порід: максимальні значення швидкості поздовжньої хвилі становлять 7661 м/с, мінімальні – 5046 м/с, швидкості поперечної хвилі – відповідно 4232 м/с та 2648 м/с.

Для аналізу зміни швидкостей пружних хвиль у зразках було проведено усереднення даних за дев'ятьма напрямками. На рис. 1 наведено розподіл усереднених швидкостей хвиль (квазіпоздовжньої та двох квазіпоперечних).

Загалом, для кожного із зразків притаманні суттєві розбіжності у величині швидкостей хвиль, виміряних на кожній із дев'яти граней зразків. Діапазон зміни значень швидкостей поздовжніх хвиль (ΔV_p) між напрямками вимірювання змінюється від 100 до 800 м/с та від 0 до 500 м/с – для швидкостей поперечних хвиль (ΔV_s). Така суттєва різниця пов'язана, на думку авторів, як з текстурними, так і зі структурними особливостями кожного зі зразків, а також їхнім мінеральним складом. Так, більшість зразків мають сланцювату та смугасто-сланцювату текстуру із частим чергуванням прошарків з різним розміром мінеральних зерен.

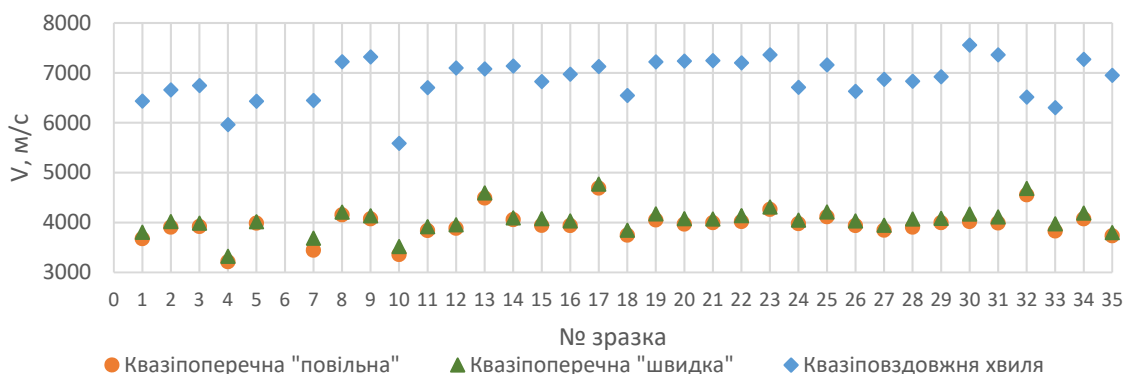


Рис. 1. Усереднені значення вимірюваних швидкостей пружних хвиль у зразках

Слід зазначити, що великий діапазон вмісту магнетиту в породах (від 0 до 40 %) слабо корелюється ($R^2 = 0,453$) із середньозваженими швидкостями акустичних хвиль.

За значеннями швидкостей пружних хвиль авторами розраховано параметри акустичного тензора зразків μ_{ij} . Дані параметри дають можливість установити типи акустичної симетрії зразків. Аналіз розрахованих параметрів акустичного тензора показав (рис. 2), що більшість зразків

(23) мають поперечно-ізоотропний тип симетрії. Даний тип симетрії притаманний більшості зразків групи кварц-магнетит-піроксенових кристалосланців, а також частині магнетит-піроксенових пісковиків, найбільше вона виявляється у частині зразків з інтервалів глибин 175–227 м та 268–271 м (ПС-30 – ПС-32). Це пояснюється їхньою сланцюватою та смугасто-сланцюватою текстурами, зокрема наявністю чітко виражених груп видовжених зерен мінералів з виразною орієнтацією в певних напрямках.

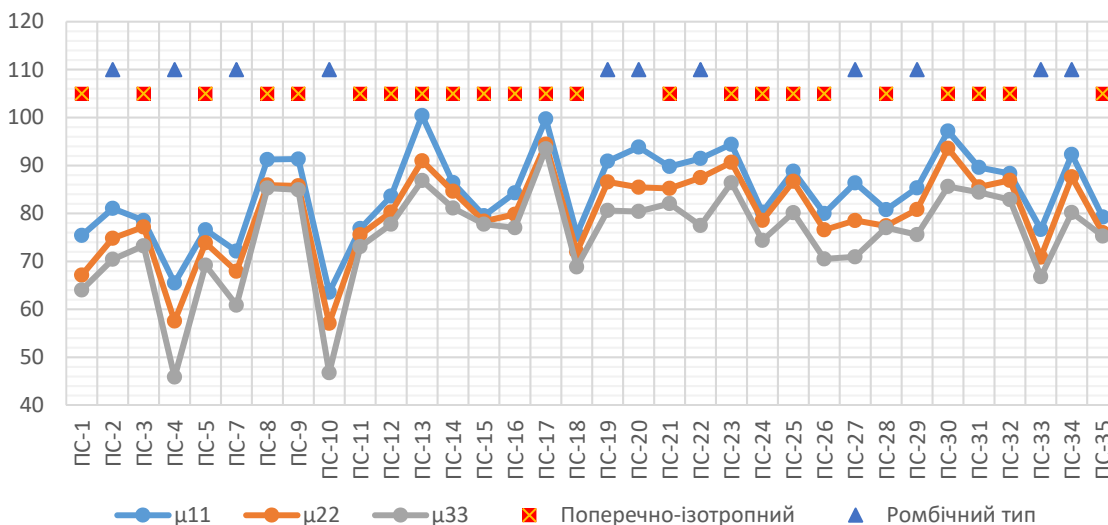


Рис. 2. Аналіз параметрів акустичного тензора зразків та їхніх типів симетрії

Ромбічний тип симетрії мають біотит-амфіболові та третина магнетит-піроксенових кристалосланців і лише два зразки (ПС-2 та ПС-27) кварц-магнетит-піроксенових кристалосланців. Зокрема, зразки ПС-2 та ПС-27 хоч і мають нечітко виражену смугасто-сланцювату текстуру, проте їхні прошарки суттєво різняться за мінеральним складом і розміром зерен. Наявність ромбічного типу симетрії говорить про суттєву структурну неоднорідність зразків, що підтверджується петрографічними даними (наявність зерен різної форми та розміру: від дрібнозернистих до крупнозернистих).

Деякі інтервали свердловини характеризуються чергуванням обох типів симетрії зразків, що можна пояснити складними тектонічними умовами, спричиненими чергуванням різнобічних термодинамічних умов. Цей факт характеризує складні умови утворення порід і дещо різні їхні деформаційні перетворення на різних глибинах. Проте більша частина зразків Піщанської структури сформована при переважанні однобічного тиску.

Структурно-текстурні особливості знайшли своє відображення і в розрахованих параметрах акустичного еліпсоїда. При порівнянні значень S_μ та L_μ ($\Delta_\mu = |S_\mu - L_\mu|$) встановлено, що найбільші їхні розбіжності притаманні групі біотит-амфіболових сланців і варіюються вони від 0,75 до 0,108. Подібне значення Δ_μ має і магнетит-піроксеновий кристалосланець ПС-22 (0,83). Зразки ПС-7-9, ПС-25 та ПС-30, що належать до різних петрографічних груп, характеризуються Δ_μ близько 0,05. Для решти зразків значення Δ_μ становлять менше 0,04.

Отримані значення S_μ та L_μ дають можливість розділити досліджені зразки на чотири групи. При аналізі графіку залежності $L_\mu = f(S_\mu)$ (рис. 3) частина точок розташована вище бісектриси – такі зразки мають аксіальну текстуру. Частина, що нижче – планальну. Окремо є значення $L_\mu = f(S_\mu)$, що розташовані близько до бісектриси чи на ній – таким зразкам притаманна ромбічна текстура.

Спираючись на розподіл швидкостей у зразках, було розраховано коефіцієнти акустичної анізотропії за двома методиками (рис. 4).

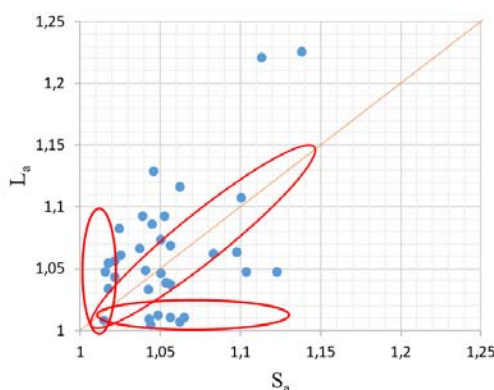


Рис. 3. Розподіл зразків за параметрами акустичного еліпсоїда

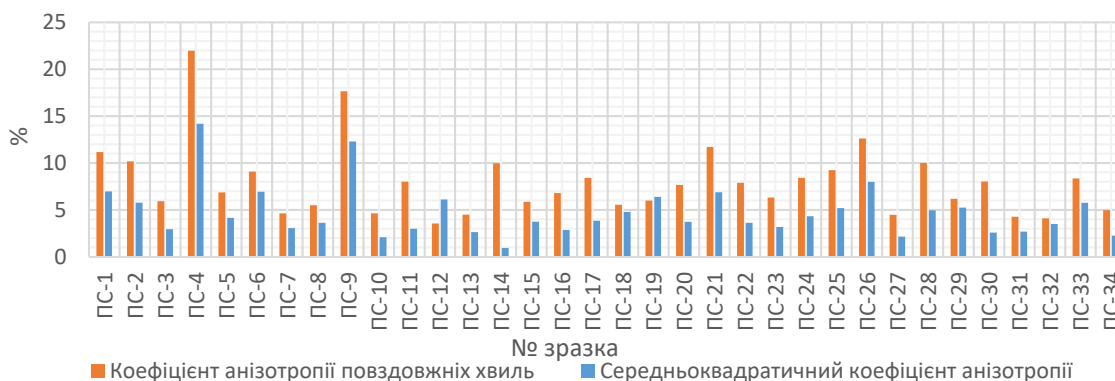


Рис. 4. Співвідношення коефіцієнтів акустичної анізотропії

Діапазон зміни величин інтегрального акустичного середньоквадратичного коефіцієнта анізотропії становить 2–14 %. На основі цих даних нами виділено три групи зразків:

- низькоанізотропні, де $A_\mu < 5\%$;
- середньоанізотропні, де $5\% < A_\mu < 10\%$;
- високоанізотропні, де $A_\mu > 10\%$.

Серед трьох петрографічних груп зразків, біотит-амфіболові кристалосланці є повністю високоанізотропними, інші дві групи мають величину коефіцієнта анізотропії від 1 до 7 %, що характеризує їх як низько- та середньоанізотропні. Попри те, що за аналізом шліфів у групі біотит-амфіболових сланців чітко вираженої структурно-текстурної анізотропії не спостерігається, за результатами петроакустичних досліджень анізотропія в ній є дуже високою. Це може бути ознакою того, що шліфи були зроблені у площині сланцюватості порід.

Здійснено розрахунок коефіцієнтів анізотропії поздовжніх хвиль (рис. 4). За результатами аналізу встановлено, що їхній діапазон зміни значно більший (4–22 %), ніж акустичного середньоквадратичного коефіцієнта анізотропії (2–14 %).

Слід відмітити, що для більшості зразків простежується кореляція між цими двома показниками, але є й такі, де спостерігаються суттєві розбіжності (зразки ПС-11, ПС-14 та ПС-30), що говорить про суттєву анізотропію поперечних хвиль, величини яких використовуються при розрахунку середньоквадратичного коефіцієнта.

Висновки. Проведені авторами дослідження акустичних властивостей порід Піщанської залізородної структури та аналіз розрахованих параметрів акустичної анізотропії дозволили зробити низку висновків.

Петроакустичні дослідження показали досить суттєву різницю (до 800 м/с) між швидкостями, що вимірювались за різними напрямками одного і того ж зразка

(9 граней). Це обумовлено як мінеральним складом порід, так і їхнім структурно-текстурними особливостями.

На основі вимірювань швидкостей пружних хвиль, авторами було розраховано коефіцієнти акустичної анізотропії, за величиною яких породи були розподілені на три групи. Розраховані за акустополаризаційним методом коефіцієнти анізотропії поздовжніх хвиль показали досить високу кореляцію з величиною інтегрального акустичного коефіцієнта анізотропії.

На основі аналізу отриманих даних до слабо- та середньоанізотропних груп автори відносять більшу частину зразків (31) зі значенням коефіцієнта анізотропії (A_{μ}) від 2 до 7 %. Більшість цих порід є сланцюватими та смугасто-сланцюватими. Особливо виділяються біотит-амфіболові кристалосланці, що є високоанізотропними породами ($A_{\mu} = 10 \pm 14$ %).

Здійснено поділ зразків за параметрами акустичного еліпсоїда. Виділено зразки з планальною, аксіальною, ромбічною текстурами. Щодо акустичної текстури, то на основі розрахованих параметрів акустичного тензора встановлено, що 75 % зразків мають поперечно-ізотропну текстуру, решта – ромбічну. За акустичною текстурою виділено три інтервали глибин свердловини, що сформовані в умовах однобічного тиску. Решта інтервалів свердловини характеризується частим чергуванням пластів, які зазнали різнобічних термодинамічних впливів, що вказує на суттєві зміни палеотектонічних умов у процесі формування Піщанської структури.

За результатами аналізу встановлено, що петрографічний опис шліфів не дав змоги чітко визначити причини таких великих значень коефіцієнтів анізотропії. Авторами планується детальніше вивчити особливості біотит-амфіболових кристалосланців, зокрема, з оцінкою їхніх пружних властивостей, а також провести дослідження електричної та магнітної анізотропії.

Список використаних джерел

- Александров, К.С., Продайвода, Г.Т. (2000). Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. Новосибирск. Изд.-во СО РАН.
- Безродний, Д., Ткачов, Л., Безродна, І. (2014). Вивчення характеру пружної анізотропії плагіомігматитів Криворізької надглибокої свердловини за даними петроакустичних досліджень. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 4(67), 49-54.
- Безродний, Д.А. (2008). Пружна анізотропія метаморфічних порід Крибасу і її використання для вирішення задач тектонофаціального аналізу. *Дис. ... канд. геолог. наук*. Київ.
- Вихва, С., Безродна, І., Безродний, Д., Попов, С. (2018). Анізотропія акустичних та пружних параметрів теригенних порід-колекторів за даними лабораторних ультразвукових досліджень. *Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості*, 1(2), 34-49. DOI: <https://doi.org/10.32822/naftogazscience.2018.02.034>
- Горбачевич, Ф.Ф. (2002). Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: Кольский научный центр РАН, ГИ.
- Горбачевич, Ф.Ф., Тришина, О.М., Ковалевский, М.В. (2017). Некоторые петрофизические свойства основных пород архейской части разреза кольской сверхглубокой скважины СГ-3. *Горные науки и технологии. Свойства горных пород. Геомеханика и геофизика*, 2, 28-42. DOI: 10.17073/2500-0632-2017-2-28-40
- Ентин, В.А. (2012). Геофизические феномены Украины. *Мінеральні ресурси України*, 4, 18-25.
- Иванкина, Т.И., Никитин, А.Н., Замятина, Н.В., Казанский, В.И., Лобанов, К.В., Жариков, А.В. (2004). Анизотропия архейских амфиболитов и гнейсов из разреза Кольской сверхглубокой скважины по данным нейтроннографического текстурного анализа. *Физика Земли*, 4, 74-87.
- Ковалевский, М.В., Горбачевич, Ф.Ф., Хармс, У., Дальхайм, Х.-А. (2012). Акустополаризационные измерения упругоанизотропных свойств метаморфизованных пород по разрезу немецкой сверхглубокой скважины КТВ. *Геофизический журнал*, 2 (34), 36-48.
- Лысенко, П. Ю. (2013). Методика оценки анизотропии и поврежденности геоматериалов методом лазерной ультразвуковой спектроскопии с использованием установки "Геоискан-02МУ". *Горный информационно-аналитический бюллетень. Спецвыпуск*, 7.
- Приходько, В. Л. (1998). Результаты работ по подготовке геофизической и геохимической основы для ГДП-200 платформенного чехла и ГТК-200 кристаллического основания на площади листа М-35-XXXVI (Гайворон). *Отчет Правобережной геофизической партии за 1991-1998 г.г.* ГРГП "Північгеологія".
- Продайвода, Г.Т., Вихва, С.А., Безродний, Д.А., Безродна, І.М. (2011). Акустичний текстурний аналіз тектонофацій метаморфічних порід Криворізької. Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".

Соболев, Г.А., Никитин, А.Н. (2001). Нейтроннография в геофизике. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, 32, 6, 1359-1404.

Тришина, О.М., Горбачевич, Ф.Ф., Ковалевский, М.В. (2007). Сравнительные характеристики упругих свойств образцов горных пород по разрезу финской скважины Оутукумпу. *Вестник МГТУ*, 10, 2, 296-303.

Черепецкая, Е.Б. (2005). Разработка лазерного ультразвукового метода диагностики структуры и свойств горных пород на образцах. *Аэро-реф. ... д-ра техн. наук*. Москва.

Bezrodnyi, D., Svystov, V., Bezrodna, I., Petrokushyn, R. (2018). Results analysis of complex magnetic surveillance of Pishchanska iron-ore structure samples. *Abstracts of the 11th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13-16 Nov., 2018, Kyiv, Ukraine.

Grishchenko, A.I., Semenov, A.S., Tretyakov, D.A., Shtukin, L.V. (2017). Relationship between the acoustic anisotropy parameter and measures of the stress-strain state for a specimen with a stress concentrator. *Proceedings of the International Conference DAYS on DIFFRACTION 2017*. 154-158. <https://doi.org/10.1016/j.spjpm.2017.02.005>

Ivankina, T.I., Kern, H.M., Nikitin, A.N. (2005). Directional dependence of P- and S-wave propagation and polarization in foliated rocks from the Kola superdeep well: evidence from laboratory measurements and calculations based on TOF neutron diffraction. *Tectonophysics*, 407(1-2), 25-42.

Kern, H., Liu, B., Popp, T. (1997). Relationship between anisotropy of P- and S-wave velocity and anisotropy of attenuation in serpentinite and amphibolite. *J. Geophys. Res.*, 102, 3051-3065.

Lokajicek, T., Kern, H., Svitek, T., Ivankina, T. (2014). 3D velocity distribution of P- and S-waves in a biotite gneiss, measure in oil as the pressure medium: Comparison with velocity measurements in a multi-anvil pressure apparatus and with texture-based calculated data. *Elsevier. Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 231, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.04.002>

Pros, Z., Babuska, V. (1967). Method for investigating the elastic anisotropy on spherical rock samples. *Zhur. Geophys.*, 83, 298-316.

Svitek, T., Vavryčuk, V., Lokajicek, T., Petružálek, M. (2014). Determination of elastic anisotropy of rocks from P- and S-wave velocities: numerical modelling and lab measurements. *Geophys. J. Int.*, 199, 1682-1697. DOI: 10.1093/gji/ggu332

References

- Aleksandrov, K.S., Prodaivoda, G.T. (2000). Anisotropy of elastic properties of minerals and rocks. Novosibirsk. SO RAN. [in Russian]
- Bezrodnyi, D., Tkachov, L., Bezrodna, I. (2014). Elastic anisotropy of plagiomigmatite core samples from Kryvoriz'ka ultradeep well: a petroacoustic investigation. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (67), 49-54. [in Ukrainian]
- Bezrodnyi, D.A. (2008). Elastic anisotropy of metamorphic rocks of Kryvbass and its use for solving the problems of tectonofacial analysis. *Diss. ... Cand. Geol. Sciences*. Kyiv [in Ukrainian]
- Bezrodnyi, D., Svystov, V., Bezrodna, I., Petrokushyn, R. (2018). Results analysis of complex magnetic surveillance of Pishchanska iron-ore structure samples. *Abstracts of the 11th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13-16 Nov., 2018, Kyiv, Ukraine.
- Cherepetskaya, E.B. (2005). Development of a laser ultrasound method for diagnosing the structure and properties of rocks on samples. *Extended abstract ... Doctor's thesis: Technical Sciences*. Moscow. [in Russian]
- Entin, V. A., (2012). Natural geophysical phenomena in Ukraine. Kiev: Publ. UkrGGRI. [in English, Russian]
- Gorbatsevich, F.F. (2002). Acoustopolariscopy of rock-forming minerals and crystalline rocks. Apatity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, GI. [in Russian]
- Gorbatsevich, F.F., Trishina, O. M., Kovalevsky, M.V. (2017). Some petrophysical properties of the main rocks from the Archaean section of the Kola superdeep borehole SG-3. *Mining science and technology*, 2, 28-40. [in Russian] DOI: 10.17073/2500-0632-2017-2-28-40
- Grishchenko, A.I., Semenov, A.S., Tretyakov, D.A., Shtukin, L.V. (2017). Relationship between the acoustic anisotropy parameter and measures of the stress-strain state for a specimen with a stress concentrator. *Proceedings of the International Conference Days on Diffraction*, 154-158. <https://doi.org/10.1016/j.spjpm.2017.02.005>
- Ivankina, T.I., Kern, H.M., Nikitin, A.N., (2005). Directional dependence of P- and S-wave propagation and polarization in foliated rocks from the Kola superdeep well: evidence from laboratory measurements and calculations based on TOF neutron diffraction. *Tectonophysics*, 407(1-2), 25-42.
- Ivankina, T.I., Nikitin, A.N., Zamyatina, N.V., Kazansky, V.I., Lobanov, K.V., Zhariikov, A.V. (2004). Anisotropy of Archean amphibolites and gneisses from the section of the Kola ultradeep borehole according to neutron diffraction texture analysis. *Fizika Zemli*, 4, 74-87. [in Russian]
- Kern, H., Liu, B., Popp, T. (1997). Relationship between anisotropy of P- and S-wave velocity and anisotropy of attenuation in serpentinite and amphibolite. *J. Geophys. Res.*, 102, 3051-3065.
- Kovalevskiy, M.V., Gorbatsevich, F.F., Khams, W., Dahlheim, H.A. (2012). Acoustic polarization measurements of elastic anisotropic properties of metamorphosed rocks along the section of german ultradeep well KTB. *Geofizicheskiy zhurnal*, 2, (34), 36-48. [in Russian]
- Lokajicek, T., Kern, H., Svitek, T., Ivankina, T. (2014). 3D velocity distribution of P- and S-waves in a biotite gneiss, measure in oil as the pressure medium: Comparison with velocity measurements in a multi-anvil pressure apparatus and with texture-based calculated data. *Elsevier. Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 231, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.04.002>

Lysenko, P. Yu. (2013). Methods for assessing anisotropy and damage to geomaterials using laser ultrasound spectroscopy using the Geoscan-02MU equipment. *Mining information and analytical bulletin. Special issue*, 7. [in Russian]
Prikhodko, V.L. (1998). The results of the robot on the preparation of the geophysical and geochemical basis for the GDP-200 platform cover and the GKG-200 crystalline base on the area of the sheet M-35-XXXVI (Gaivoron). *Report of the Right Bank Geophysical Party for 1991-1998*. GRGP "Pivnichgeologiya". [in Russian]

Prodivoda, G.T., Vizhva, S.A., Bezrodnyi, D.A., Bezrodna, I.M. (2011). Acoustical texture analysis of metamorphic rocks Krivorizhzhya. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]

Pros, Z., Babuska, V. (1967). Method for investigating the elastic anisotropy on spherical rock samples. *Zhur. Geophys.*, 83, 298-316.

Sobolev, G.A., Nikitin, A.N. (2001). Neutronography in geophysics. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra*. 32 (6), 1359-1404. [in Russian]

Svitek, T., Vavryčuk, V., Lokajčiek, T., Petružálek, M. (2014). Determination of elastic anisotropy of rocks from P- and S-wave velocities: numerical modelling and lab measurements. *Geophys. J. Int.*, 199, 1682-1697.

Trishina, O.M., Gorbatshevich, F.F., Kovalevsky, M.V. (2007). Comparative characteristics of the elastic properties of rock samples in the section of the Finnish well Outokumpu. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 10 (2), 296-303. [in Russian]

Vizhva, S.A., Bezrodnyi, D.A., Bezrodna, I.M., Popov, S.A. (2018). Anisotropy of acoustic and elastic parameters of terrigenous reservoir rocks according to the ultrasonic explorations. *Problems and prospects of oil and gas industry*, 1(2), 34-49. <https://doi.org/10.32822/naftogazscience>. 2018.02.034 [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 14.07.19

I. Bezrodna, PhD (Geol.), Senior Researcher,

E-mail: bezin3@ukr.net;

V. Svystov, PhD student,

E-mail: wladsvyst@ukr.net;

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

E-mail: manific2@ukr.net;

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

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

ANALYSIS OF ACOUSTIC ANISOTROPY PARAMETERS OF PYROXENE-MAGNETITE ROCKS OF THE PISCHANKA STRUCTURE

The analysis of the results of acoustic properties of rocks study of Pischans'ka iron-ore structure is presented.

The aim of the work is to establish the features of the distribution of acoustic properties and parameters of acoustic anisotropy in samples of core rocks selected from the well No. 3 of the Pischans'ka structure to determine the nature of its occurrence.

A sample of 35 samples from the depth range 144-273 m is divided into 3 groups of rocks, namely: magnetite-pyroxene, quartz-magnetite-pyroxene and biotite-amphibole crystalline shales.

Based on an invariant polarization method, a number of acoustic laboratory measurements have been carried out. The values of the measured phase velocities "quasi-longitudinal" and two "quasi-transverse" waves at the stage of measurements showed significant acoustic anisotropy of the rocks. The ranges of the measured speeds of the collection samples are 7661 ± 5046 m/s for longitudinal waves and 4232 ± 2648 m/s for transverse ones. The difference in values measured for each of the sides of the cubic rhombic dodecahedron is from 100 to 800 m/s and from 0 to 500 m/s for V_p and V_s , respectively.

The parameters of an acoustic ellipsoid were calculated, on the basis of which the division of samples into 3 main groups has been performed, according to the acoustic texture: acoustically linear, shale and rhombic. Separately, a group of samples with a more complex texture was discovered.

The analysis of coefficients of anisotropy by different methods is carried out: longitudinal, transverse and relative acoustic anisotropy. Most of the samples are characterized by low or average acoustic anisotropy (from 2 to 7 %). A group of highly anisotropic rocks (11-14 %), represented by samples of biotite-amphibole crystalline silicates, is singled out.

According to the parameters of the acoustic tensor of most samples, the transverse isotropic type of symmetry inherent to samples from the depth intervals 174-220 m and 222-232 m, while the smaller part is rhombic, is inherent. Differences in the parameters of anisotropy of samples can be explained by the significant heterogeneity of their textures, namely: micro cracks, minerals of various sizes, shapes and orientations.

The results of the research show that the acoustic properties of the samples are quite heterogeneously distributed along the investigated depth range. This indicates the difficult conditions for the formation of rocks at different depths and the presence of different types of deformations, which accompanied the formation of the Pischans'ka structure.

Keywords: acoustic anisotropy, texture, symmetry, tensor.

И. Безродная, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,

E-mail: bezin3@ukr.net;

В. Свистов, асп.,

E-mail: wladsvyst@ukr.net;

Д. Безродный, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: manific2@ukr.net;

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

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

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПИРОКСЕН-МАГНЕТИТОВЫХ ПОРОД ПЕСЧАНСКОЙ СТРУКТУРЫ

Представлен анализ результатов исследования акустических свойств пород Песчанской железорудной структуры.

Целью работы является установление особенностей распределения акустических свойств и параметров акустической анизотропии в образцах пород керна, отобранного из скважины № 3 Песчанской структуры, для определения природы ее возникновения.

Выборка из 35 образцов из интервала глубин 144-273 м разделена на три группы пород, а именно: магнетит-пироксеновые, кварц-магнетит-пироксеновые и биотит-амфиболовые кристаллические сланцы.

На основании инвариантно-поляризационного метода осуществлен ряд петроакустических лабораторных измерений на образцах пород в форме куборомбододекаэдра. Значения измеренных фазовых скоростей "квазипродольной" и двух "квазипоперечных" волн еще на этапе измерений показали существенную акустическую анизотропию пород. Диапазоны измеренных скоростей образцов коллекции составляют 7661 ± 5046 м/с для продольных волн и 4232 ± 2648 м/с для поперечных. Разница значений, измеренных для каждой из пар граней куборомбододекаэдра составляет от 100 до 800 м/с для V_p и от 0 до 500 м/с - для V_s .

Рассчитаны параметры акустического эллипсоида, по соотношениям которых осуществлено разделение образцов на три основные группы по акустической текстуре: акустически линейная, сланцеватая и ромбическая.

Проведен анализ коэффициентов анизотропии по результатам измерения скоростей волн: продольной и относительной акустической анизотропии. Большинство образцов присущ низкий или средний уровень акустической анизотропии (от 2 до 7 %). Выделены группы высокоанизотропных пород (11-14 %), представленных образцами биотит-амфиболовых кристаллосланцев.

По параметрам акустического тензора большинства образцов присущ поперечно-изотропный тип симметрии, который характерен для образцов из интервалов глубин 174-220 м и 222-232 м, меньшей части - ромбический. Разногласия по параметрам анизотропии образцов можно объяснить существенной неоднородностью их текстур, а именно: микротрещинами, минералами разного размера, формы и ориентации.

Результаты исследований показывают, что акустические свойства образцов отличаются вдоль интервала глубин. Это связано с различным минералогическим составом пород, а также свидетельствует о сложных условиях образования пород на разных глубинах и присутствием различных типов деформаций, сопровождавших формирование Песчанской структуры.

Ключевые слова: акустическая анизотропия, текстура, симметрия, тензор.

УДК 550.837:550.8.05

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.07>В. Ільєнко, пров. інж.,
E-mail: ivageophysicist@gmail.com;

Т. Бурахович, д-р геол. наук,

E-mail: burahovich@ukr.net;

А. Кушнір, канд. геол. наук,

E-mail: antonnn@ukr.net;

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,

пр. Палладіна 32, м. Київ, 03680, Україна;

С. Попов, канд. геол. наук,

E-mail: 814614@ukr.net;

О. Омельчук, канд. геол.-мінералог. наук,

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

МТ/МВ ДОСЛІДЖЕННЯ В ЗОНІ ЕНДОКОНТАКТУ КОРНИНСЬКОГО ГРАНІТНОГО МАСИВУ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук О.І. Меньшовим та канд. фіз.-мат. наук М.В. Ревею)

У 2018–2019 роках проводились роботи з вивчення глибинної геоелектричної будови складної системи перетину субширотної зони між Андрушівським і Машеринським розломами й субмеридіональними розломами Брусилівським і Вільшанським. Виконано площові синхронні спостереження низькочастотного природного електромагнітного поля Землі іоносферно-магнітосферного походження в широкому діапазоні періодів.

Було проведено оцінювання передавальних операторів МТ/МВ полів за допомогою застосування програмного комплексу PRC-MTMV. Отримано оцінки типперів для періоду геомагнітних варіацій від 50 до 3100 с, а також кривих позірною опорю й фаз імпедансу від 20 до 10000 с.

За інтерпретацією результатів магніотелуричних досліджень було чітко зафіксовано Брусилівський глибинний розлом у вигляді субвертикальної поверхневої низькоомної аномалії. Аналізуючи ці та попередні роботи, можна констатувати, що в межах Волинського мегаблока УЩ Брусилівський глибинний розлом проявляється аномальною високопровідною (з поверхні) структурою. У межах Росинського мегаблока Брусилівська зона розломів не є повністю аномальною, тільки її окрема складова (Великоєрчиківський розлом) має провідність, яка зменшується майже в чотири рази.

Менш чітко виділяється відносно електропровідна з поверхні західна межа Корнинського масиву, яка, скоріш за все, пов'язана з поверхневою провідністю малопотужних осадових відкладів або тріщинуватістю порід кристалічного фундаменту.

Слід зазначити, що на псевдорозрізах магніотелуричних параметрів пункт SUS (пікет 14 км) не проявився як аномальний, але особливості поведінки кривих для різної поляризації та досить низькі магнітоваріаційні характеристики можуть свідчити про те, що глибинну будову району необхідно віднести до неоднорідної. Тим більше, що цей пункт розташований поблизу зони метасоматично змінених порід з різнонаправленою системою розломів низького рангу. Одним із пояснень цього може бути те, що процеси вторинних змін у гранітоїдах не призводять до підвищення пористості, оскільки розчини, які відфільтровуються, одразу насичуються кальцієм та лугами й заповнюють шляхи міграції флюїдів.

Ключові слова: магніотелуричні та магнітоваріаційні методи, аномалії електропровідності, зони розломів, зони метасоматозу.

Вступ. Електропровідність геологічних утворень залежить, по-перше, від їхнього мінерального й літологічного складу, проникності формацій, мінералізованості водних розчинів у минулому й сучасних, а по-друге, від наявності в геологічних утвореннях високопровідних сульфідних мінералів, графіту та ін.

Метаморфогенні родовища пов'язані з виділенням із вмісних порід елементів рудної речовини під час метаморфізму та метасоматозу під впливом термодинамічних умов. Також певною мірою на утворення метаморфогенних родовищ можуть впливати наявні флюїди розчинних з'єднань рудних елементів, що локалізуються вздовж зон підвищеної проникності (рудопровідні канали). Відкладення рудних і жильних матеріалів відбувається у рудолокалізуючих системах під впливом існуючих високих температур і тиску. Такий процес характерний для умов складкоутворення, тріщиноутворення, зминання та брекчіювання порід.

Питомий електричний опір (ρ) гірських порід також залежить від типів метаморфічних процесів. У межах одних рудоносних зон рудні тіла виділяються як менш електропровідні (більш високоомні) порівняно із вмісним середовищем об'єкти, що пояснюється зменшенням у них вмісту вуглецевої речовини та збільшенням вмісту кварцу. У межах інших рудоносних зон рудні тіла є більш електропровідними (більш низькоомними) об'єктами, ніж вмісне середовище, що пояснюється збільшенням у них вмісту сульфідів. Так, наприклад, на Бобрівському родовищі Донбасу золоте зруденіння зазвичай фіксується зонами максимальних градієнтів аномально низьких значень позірною опорю ρ_n (Белявський і др., 1999), оскільки

в електричному полі метасоматити проявляються як провідники з підвищеною електропровідністю. У межах Клинцівського золоторудного родовища Українського щита (УЩ) питомий електричний опір прожилкових рудних зон має знижені значення і змінюється у межах від 50 до 100 Ом·м, водночас кварцові рудні зони суттєво більш високоомні ($\rho = 2000\text{--}2500$ Ом·м).

Загальною рисою більшості металогенічних зон України з присутністю в них золотого зруденіння, є наявність у земній корі проникних електропровідних каналів, витягнутих на багато десятків кілометрів (Белявський і др., 1999). Так, Кіровоградська глибинна зона розломів (ЗР), у межах східного борту якої розташоване Клинцівське рудне поле, обмежує із заходу відому регіональну Кіровоградську аномалію електропровідності. Також Савранське рудне поле розташоване в найбільш проникній та провідній центральній частині Голованівської шовної зони (ГШЗ), де інтегральна провідність шарів у корі сягає 2000 См.

Часто родовища і рудопрояви корисних копалин центральної частини УЩ розташовані безпосередньо у межах приповерхневих аномальних зон електропровідності (глибини 0–100 м). Особливо яскраво це виявлено в Субботсько-Мошоринській ЗР та її західному продовженні, що фіксується аномаліями електропровідності в ГШЗ, у межах яких локалізуються родовища і рудопрояви графіту, урану, золота (зокрема Майське родовище), заліза, нікелю, кобальту. За даними (Бурахович і др., 2016) перспективні концентрації урану і золота часто приурочені до лінійних аномалій електропровідності на глибинах 0,1–2,5 км в Інгільському мегаблоці УЩ і пов'язані із зонами метасоматично змінених порід. Слід

виділити зв'язок зон підвищеної електропровідності – Кіровоградської, Первомайської, Бобринецької ЗР з родовищами і рудопроявами різних корисних копалин. Подібні аномалії виявлені й у ГШЗ, з ними також пов'язані родовища і рудопрояви золота, урану, графіту, літію в Первомайській ЗР і поблизу Тальнівської ЗР (Савранське рудне поле).

З наведеного вище випливає, що електричні, у загальному, та магнітотелуричні (МТ) методи, зокрема, посідають значне місце серед геофізичних методів при пошуках рудопоявів, які пов'язані з інтенсивними метасоматичними перетвореннями, що призвели до утворення родовищ золота.

До передумов для пошуку зруденіння золота, визначених згідно з даними (Анциферов *и др.*, 2009), відносять: наявність потужних витягнутих тектонічних зон з інтенсивним проявленням у них метасоматозу; значне

розповсюдження формацій, збагачених сульфідами, а також основних порід (кристалосланців), у яких можливе гідротермальне зруденіння золота; велика кількість виявлених на території досліджень геохімічних аномалій золота та їхні численні знахідки при проведенні шліфового опробування.

З огляду на зазначені вище передумови однією з перспективних площ для пошуків золотого зруденіння є Корнинська (рис. 1), на якій у попередні роки геоелектричні дослідження не проводилися. У межах цієї площі розташований Брусилівський глибинний розлом, який у межах Волинського мегаблока УЩ проявляється аномальною високопровідною (з поверхні) структурою. Крім того, у районі с. Криве, Корнинського району у базальному шарі бучацьких відкладів знайдено кварц із сульфідною мінералізацією та вмістом золота 0,24 г/т.

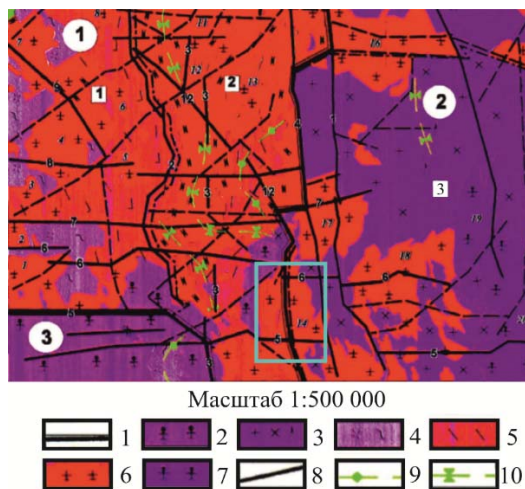


Рис. 1. Геологічна карта поверхні кристалічного фундаменту (Державна..., 2003). Умовні позначення:

1 – границі мегаблоків (цифри в колах: 1 – Волинський; 2 – Росинський; 3 – Подільський); 2 – бердичівські граніти і мігматити; 3 – амфіболіти і гнейси росинсько-тікицької серії; 4 – гнейси і кристалосланці василівської світи; 5 – гнейси і кристалосланці городської світи; 6 – масиви гранітів житомирського і уманського комплексів; 7 – масиви гранітів фастівського комплексу; 8 – основні розломи; 9 – осі антиклінальних структур; 10 – осі синклінальних структур. (Цифрами у квадратах позначено блоки другого порядку: 1 – Коростишівський; 2 – Кочерівський (синкліній); 3 – Федорівський). Синім прямокутником виділено Корнинський гранітний масив

Мета роботи: проведення сучасних експериментальних досліджень МТ/МВ методами, обробка польових даних та їхня інтерпретація для виявлення аномалій підвищеної електропровідності, імовірно пов'язаних із метасоматитами із золотим зруденінням у зоні ендоконтакту Корнинського гранітного масиву західної частини УЩ (рис. 1). Сам масив розташований на обох берегах ріки Ірпін, має площу близько 60 км² і витягнутий у субмеридіональному напрямку.

Сучасні експериментальні МТ/МВ дослідження. З упровадженням цифрових магнітотелуричних станцій з високоточною синхронізацією, таких як LEMI-417 (<https://www.isr.lviv.ua/lemi417ru.htm>), прийшло розуміння важливості синхронних спостережень для послаблення завад у традиційних МТ/МВ дослідженнях. Технології двоточкових зондувань з віддаленою базою ("remote reference", RR) стали потужним засобом боротьби із систематичними спотвореннями локальних передавальних операторів – імпедансу й типпера.

У 2018 році були проведені геоелектричні дослідження з вивчення глибинної геоелектричної будови складної системи перетину субширотної зони між Андрушівським і Машеринським розломами та субмеридіональними Брусилівським і Вільшанським. Вони включали площадні синхронні спостереження низькочастотного природного електромагнітного поля Землі іоносферно-магнітосферного походження в широкому діапазоні періодів (T) на

ряді пунктів у межах Корнинського гранітного масиву, розташування яких наведено на рис. 2. На базовому пункті Рудка (RDK), що на заході Корнинського гранітного масиву, спостереження тривали протягом 7 діб. У польових пунктах на півночі масиву – Королівка (KRL), розташованого біля Корнинського гранітного родовища, та Корнин (KRN), що в зоні перетину Машеринського з Брусилівським розломами, а також у пункті Соболівка (SBL) на заході за межами масиву, де розповсюджені бердичівські граніти й мігматити з останцями порід дністровсько-бузької серії (біотитові кристалосланці), дослідження проводились одну добу. Відстань між пунктами спостережень у середньому становила 3–4 км.

У 2019 році були проведені спостереження за межами Корнинського масиву – на сході від Брусилівського розлому в пунктах Суцанка (SUS) та Ставище (STA), які розташовані в межах кристалосланцевого та гранітного масивів відповідно у Федорівському блоці Росинського мегаблока УЩ (рис. 1). Відстань між пунктами становила 7 км.

Оцінювання передавальних операторів МТ/МВ полів проводилось із застосуванням програмного комплексу PRC-MTMV (Варенцов, 2013). Були отримані оцінки типперів для періодів (T) геомагнітних варіацій від 50 до 3100 с, а також кривих позірної опоры (ρ_n) та фаз імпедансу (ϕ) у межах T від 20 до 10000 с.

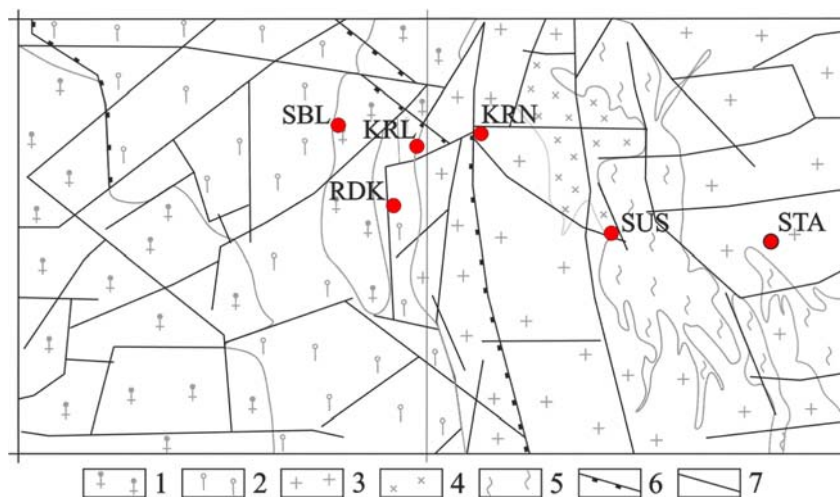


Рис 2. Тектонічна карта з позначеними на ній пунктами вимірювання:

1 – мігматити гранат біотитові; 2 – гнейси; 3 – граніти; 4 – гранодіорити; 5 – кристалосланці; розломи: 6 – скиди; 7 – основні; • KRN – пункти спостережень

У межах західної частини УЩ (Белявський і др., 2001; Кулик і Бурахович, 2007) чітко спостерігається зміна орієнтації вектора Візе (**W**) від південно-західного на Волинському мегаблоці, до північно-західного – на Подільському. Лише південніше широти, на якій розташовано місто Вінниця, вектор **W** розвертається на південь. Модуль вектора **W** у середньому дорівнює 0,3. На орієнтацію індукційних параметрів впливають телуричні струмові системи, що виникають в електропровідних осадових відкладах Дніпровсько-Донецької западини і Чернівецько-Коростенській, Вінницькій та Ружинській аномальних зонах. На УЩ сумарна поздовжня провідність (*S*) осадових утворень у середньому змінюється від 0,25 – на Волинському та Росинському мегаблоках, до 10 См на Подільському. Аналіз параметрів аномалій електропровідності на основі побудови регіональних моделей різного рангу (2D, квазі 3D та 3D) наведено у статті (Ільєнко та ін., 2019). Територія, де виконувалися геоелектричні дослідження, яким присвячена дана стаття, розміщена в складній зоні чергування областей з нормальними для території УЩ значеннями питомого опору ($\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), просторово локалізованих у земній корі на глибинах від 15 до 30 км, і областей з високою провідністю ($\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), що розташовані в межах Чернівецько-Коростенської аномальної зони.

Отримані сучасні спостереження комплексних індукційних параметрів не суперечать даним геоелектричних досліджень, одержаним у попередні роки, і доповнюють картину просторового розподілу векторів Візе. Майже на всіх частотах для всіх пунктів спостережень (рис. 3) спостерігається орієнтація дійсної компоненти типпера (**ReW**) захід – південний захід. На коротких періодах величини уявної (**ImW**) та **ReW** компонент співмірні. Незначний розворот північної компоненти спостерігається між пунктами SBL та KRL, SUS та STA. Таке незначне варіювання орієнтації типперів можливо пов'язано з тим, що пункти спостереження розміщено в межах різних за складом мозаїчно розташованих комплексах гірських порід. А саме, пункт SBL розташований у гранатбіотитових мігматитах, KRL – у гнейсах; SUS – у кристалосланцях, STA – у гранітах. Максимум частотної характеристики, величиною в середньому 0,35, знаходиться на періоді близько 200 с. Зі збільшенням *T* до 1000 с кут між **ReW** і **ImW** знаходиться в інтервалі $90^\circ\text{--}135^\circ$, величина **ImW** у 2–3 рази менша, що може свідчити про неоднорідний тривимірний глибинний розподіл електропровідності. Це

більш чітко підтверджується на періодах $T > 1500 \text{ с}$: дійсна компонента типпера **ReW** розвертається на північний-захід, особливо у пунктах RDK та KRN, і її значення наближається до 0 у пункті SUS; орієнтація уявної компоненти типпера **ImW** переважно східна, кут між **ReW** й **ImW** коливається в межах 45° , за величиною компоненти типпера майже однакові.

Аналіз отриманих амплітудних кривих магнітотелуричних зондувань (МТЗ) свідчить, що в пункті SBL, розташованому за межами Корнинського гранітного масиву, амплітудні криві МТЗ для обох поляризацій до періоду $T \approx 200 \text{ с}$ на одному рівні значень позірного опору (ρ_n) – у середньому $300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (рис. 4). Зі збільшенням *T* криві ρ_n розходяться і, якщо для меридіональної поляризації (меридіональна ху-орієнтація вимірювальної лінії) значення позірного опору $\rho_{n,yx}$ варіюють у межах $300\text{--}200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, то позірний опір на кривих МТЗ для широтної поляризації ($\rho_{n,yx}$) спадає до $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. З подальшим збільшенням періоду крива $\rho_{n,yx}$ зближується з кривою $\rho_{n,yx}$ і на $T \approx 8000 \text{ с}$ значення позірного опору на обох кривих становить $\rho_n = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. На цих кривих відсутня висхідна гілка на коротких періодах, що свідчить про відсутність провідного поверхневого осадового шару. Низхідна гілка на довгих періодах *T* виходить на рівень глобальних даних, але водночас вона за своїм низьким рівнем ρ_n не відповідає нормальній кривій МТЗ для УЩ ($\rho_n \approx 800\text{--}1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Криві МТЗ для різної поляризації в межах Корнинського гранітного масиву розбіжні на всіх періодах. У пункті KRL рівень значень позірного опору на кривих $\rho_{n,yx}$ становить $10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а на кривих $\rho_{n,yx}$ – $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. В інтервалі довгих періодів ($T > 8000 \text{ с}$) спостерігається тенденція до зближення кривих позірного опору, тоді як їхній рівень майже на два порядки перевищує рівень глобальних даних.

У пунктах RDK та KRN особливості кривих позірного опору для різних поляризацій подібні, хоча поведінка кривих, особливо $\rho_{n,yx}$, дещо відрізняється. Розбіжність кривих для різної поляризації зростає зі збільшенням *T* – від менше ніж 0,5 до 1 порядку в пункті RDK і від 1 до 1,5 порядків у пункті KRN. Позірний опір на кривих $\rho_{n,yx}$ у всьому частотному діапазоні знаходиться на рівні $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ з несуттєвими варіаціями. Криві $\rho_{n,yx}$ характеризуються наявністю спадних гілок, у межах яких позірний опір зменшується від 700 до $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ у пункті RDK і від 100 до $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ у пункті KRN.

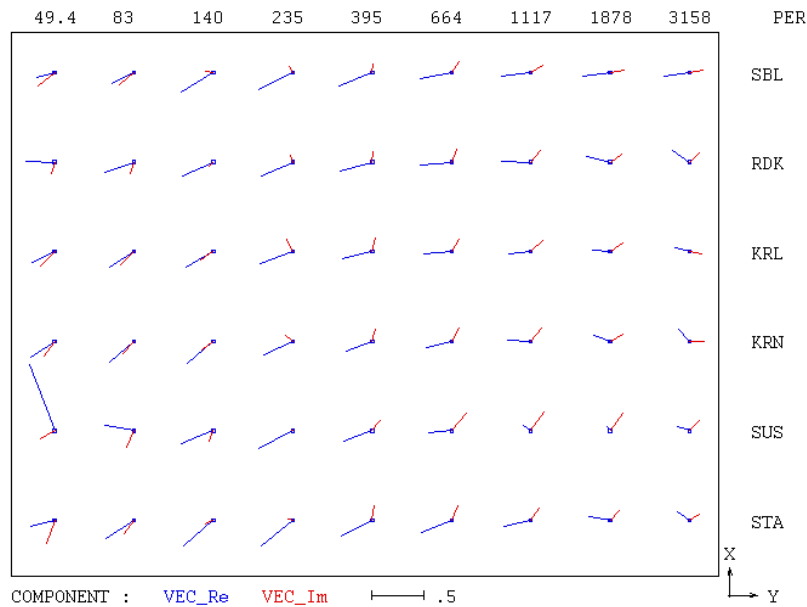


Рис. 3. Спостережені дійсні та уявні компоненти типпера за даними МВП для періодів геомагнітних варіацій від 50 до 3100 с

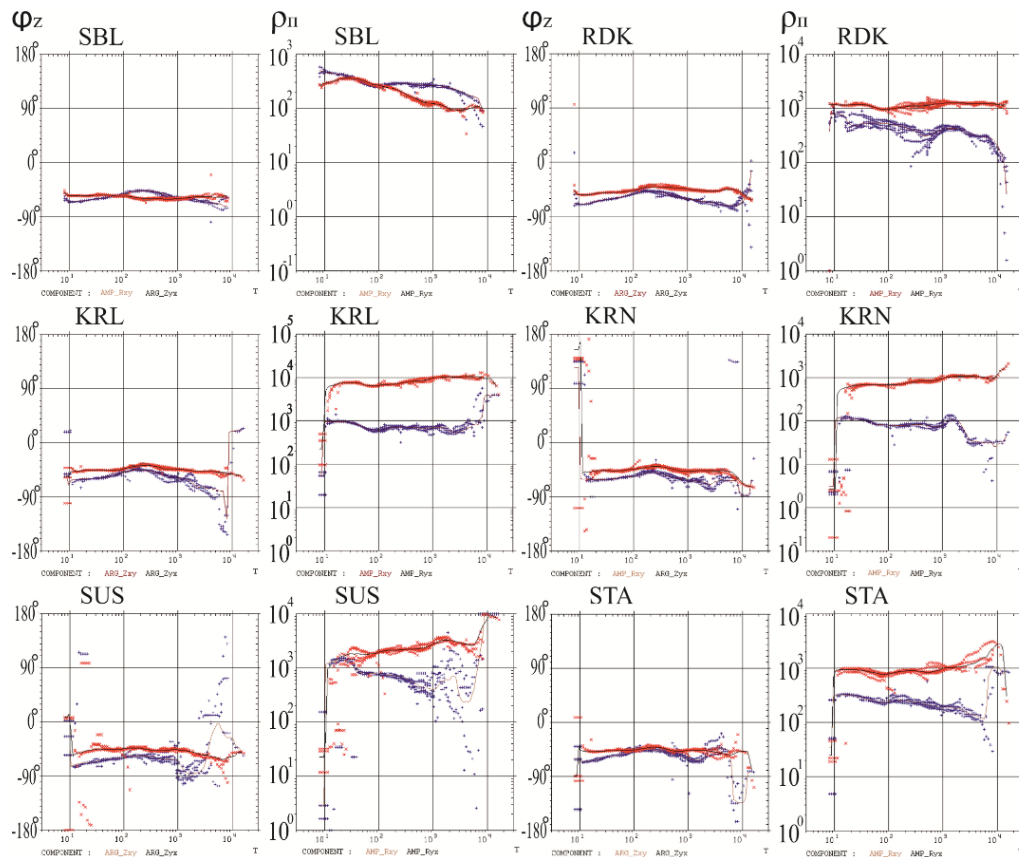


Рис. 4. Криві фази імпедансу (φ_z) і позірнього опору (ρ_n) для різних поляризацій МТ-поля: поляризація x позначена синім кольором, y - червоним

За межами Корнинського масиву в пунктах SUS та STA характер поведінки кривих МТЗ мало відрізняється від особливостей кривих, розглянутих вище, а саме: розбіжність кривих збільшується зі зростанням періоду від 0–0,5 до більш ніж одного порядку; рівень значень позірнього опору на кривих для широтної поляризації ($\rho_{n,y}$) становить 1000–3000 Ом·м; криві $\rho_{n,y}$ характеризуються наявністю спадних гілок, у межах яких позірний опір знижується від 300–500 до 100 Ом·м. У пункті SUS на періодах $T > 1000$ с спостерігається значна нестійкість розрахункових значень $\rho_{n,y}$.

Розбіжність позірних опорів, отриманих за результатами аналізу варіацій різних поляризацій МТ-поля ($\rho_{n,y} \neq \rho_{n,x}$), свідчить про наявність у горизонтально-шаруватому розрізі електропровідних неоднорідностей (рис. 5), які можуть бути як локальні поверхневі, так і глибинні – у пунктах SBL (пікети 0–2 км), KRN (пікети 6–9 км) та STA (пікети 18–20 км). Вони краще проявились на субширотному псевдорозрізі і меншою мірою – на субмеридіональному.

На всій площі робіт значення фази на фазових кривих $\varphi(T)$ в інтервалі періодів $T < 1000$ с змінюється від -40° до -70° . Зі збільшенням T фаза знижується і в пунктах RDK,

KRL, KRN і SUS (пікети 4–14 км) ф для поляризації ху на періоді $T = 10000$ с досягає значень, менших за -75° . На псевдорозрізі фази ефективного імпедансу ($\varphi_{\text{еф}}$) електропровідні неоднорідності практично не проявилися.

Характерні особливості кривих МТЗ субмеридіонального профілю Радомишль–Фастів (Ніколаєв та ін.,

2019), розташованого північніше, на відстані 40 км від профілю Корнинський, схожі з даними спостережень по Корнинському профілю в інтервалі пікетів 6–9 км (пункт спостережень KRN, рис. 5), що може вказувати на однакову геоелектричну обстановку в зоні Брусилівського глибинного розлому.

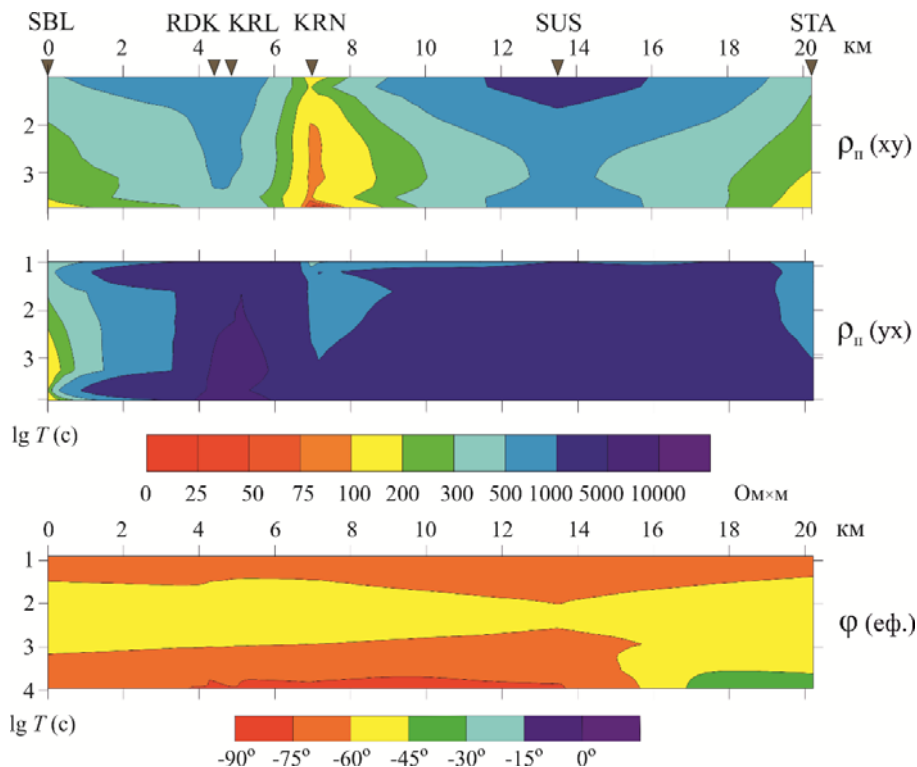


Рис 5. Псевдорозрізи позірного опору (ρ_p) для поляризацій ху та ух і фази ефективного імпедансу ($\varphi_{\text{еф}}$) вздовж профілю Корнинський

Обговорення. Геологічно Корнинські граніти мало вивчені. Майже єдиний їхній опис представлений в роботі (Бойченко, 2000). Занурюючись під Кочерівський синклінорій, вони можуть являти собою апікальну частину гранітного масиву. Гравітаційне та магнітне поля над ним від'ємні, малоамплітудні й слабо диференційовані. Характер полів відповідає фізичним властивостям гранітів, які є складовими масиву: їхня густина дорівнює $2,8 \text{ г/см}^3$, магнітна сприйнятливості (χ) $(30-70) \times 10^{-5}$ од. СІ для сірих гранітів, і $(70-150) \times 10^{-5}$ од. СІ для рожевих гранітів з калієвими польовими шпатами. З огляду на магнітні властивості гранітів слабо градієнтне витримане магнітне поле свідчить про розвиток сірих гранітів і лише в крайових частинах масиву з'являються магнітні аномалії, пов'язані з появою рожевих гранітів.

Необхідно відмітити малу кількість та обмежену різновидність жильної фази в Корнинському гранітному масиві, що вказує на в'язкий стан речовини під час формування масиву та малий розвиток розломів і тріщин у подальшому, що призвело до суттєвого послаблення процесів міграції метасоматичних розчинів.

Майже всі глибинні розломи північно-західної частини УЩ характеризуються прирозломним метасоматозом, який проявлений кварц-сульфідними жилами у вмисних породах, утворенням польовошпатових метасоматитів і зон грейзенізації.

За проведеними магнітотелуричними дослідженнями чітко фіксується Брусилівський глибинний розлом у вигляді субвертикальної поверхневої низькоомної аномалії із значеннями позірного опору ρ_p близько $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (пункт спостереження KRN). Отже, за цими і за попередніми даними (Ніколаєв та ін., 2019) можна констатувати, що в

межах Волинського мегаблока УЩ Брусилівський глибинний розлом проявляється аномальною високопровідною (з поверхні) структурою. У межах Росинського мегаблока Брусилівська зона розломів не повністю аномальна, лише її окрема складова, до якої належить Великоерчиківський розлом, є аномальною. У межах цього розлому провідність зменшується майже в чотири рази і ρ_p дорівнює близько $200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Виходячи з цього, видовжена більш ніж на 150 км структура із шириною від 1 до 8 км , у межах якої позірний опір змінюється від 50 до $200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, не може розглядатися як двовимірний і повинна інтерпретуватися в рамках тривимірних моделей.

Менш чітко виділяється відносно електропровідна (з поверхні) західна границя Корнинського масиву, яка, скоріш за все, пов'язана з поверхневою провідністю малопотужних осадових відкладів або з тріщинуватістю порід кристалічного фундаменту.

Необхідно підкреслити, що на псевдорозрізах магнітотелуричних параметрів пункт SUS (пікет 14 км) не проявився як аномальний, але саме поведінка кривих для різної поляризації, а не їхній рівень, та особливо низькі магнітоваріаційні характеристики можуть свідчити про те, що глибинну будову району необхідно віднести до неоднорідної. Тим більше, що цей пункт розташований поблизу зони метасоматично змінених порід і різнонаправлених розломів низького рангу. Процеси вторинних змін у гранітоїдах не призводять до підвищення пористості, оскільки розчини, які відфільтровуються, одразу насичуються кальцієм та лугами й заповнюють шляхи міграції флюїдів.

Подальші дослідження слід проводити за межами Корнинського масиву, у зонах прирозломного метасома-

тозу, які добре розвинуті із заходу масиву. Також перспективним для дослідження МТ/МВ методами є Андрушівська зона розломів, яка розташована на південь від гранітного масиву.

Публікація містить результати досліджень, проведених за фінансової підтримки за науковою темою Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України: "Геологічна будова Побузького гірсько-рудного району за сучасними геофізичними і геологічними даними та оцінка його перспектив на стратегічні мінеральні ресурси 2016 р. – 2020 р.", № держ. реєстрації 0116U006203.

Список використаних джерел

- Анциферов, А.В., Шеремет, Е.М., Есипчук, К.Е., Анциферов, В.А., Пигулевский, П.И., Кулик, С.Н., Бурахович, Т.К., Кривдык, С. Г., Загнитко, В.Н., Николаев, Ю.И., Николаев, И.Ю., Сетая, Л.Д., Зюльцле, В.В., Никиташ, Л.П. (2009). Геолого-геофизическая модель Немировско-Кочеровской шовной зоны Украинского щита. Донецк: Вебер.
- Белявский, В.В., Азаров, Н.Я., Белявский, В.В., Гошовский, С.В., Чупрынка, И.С., Шумлянский, В.О., и др. (1999). Геоэлектрические модели золоторудных месторождений Украинского щита и Донбасса. Киев: Знання.
- Белявский, В.В., Бурахович, Т.К., Кулик, С.Н., Сухой, В.В. (2001). Электромагнитные методы при изучении Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Знання.
- Бойченко, С.А. (2000). Корнинский гранит – структурно-текстурные особенности, состав и генезис. В сб. "Геология и магматизм докембрия УЩ", Киев, 127-129.
- Бурахович, Т.К., Николаев, И.Ю., Шеремет, Е.М., Ширков, Б.И. (2016). Аномалии электропроводности по результатам трёхмерного геоэлектрического моделирования и полезные ископаемые центральной части Украинского щита. *Вестник Пермского университета. Серия "Геология"*, 3, 47-56.
- Варенцов, И.М. (2013). Программная система PRC_MTMV для обработки данных синхронных МТ/МВ зондирований. *Материалы VI Всероссийской школы-семинара по ЭМ зондированиям им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. ИГиГСО РАН, Новосибирск*, 1-4.
- Державна геологічна карта України масштабу 1:200000 аркуша М-35-XVIII (Фастів). (2003). Київ: Геоінформ.
- Ільєнко, В.А., Кушнір, А.М., Бурахович, Т.К. (2019). Електромагнітні дослідження Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофізичний журнал*, 4 (42), 97-113.

Кулик, С.Н., Бурахович, Т.К. (2007). Трёхмерная геоэлектрическая модель земной коры Украинского щита. *Физика Земли*, 4 (43), 21-27.

Николаев, И.Ю., Кушнір, А.М., Ільєнко, В.А. (2019). Електромагнітні дослідження західної частини Українського щита. *Геофізичний журнал*, 3 (41), 120-133.

References

- Antsiferov, A.V., Sheremet, E.M., Esipchuk, K.E., Antsiferov, V.A., Pigulevsky, P.I., Kulik, S.N., Burakhovich, T.K., Krivdyk, S.G., Zagnitko, V.N., Nikolaev, Yu.I., Nikolaev, I.Yu., Setaya, L.D., Zulze, V.V., Nikitash, L.P. (2009). Geological and geophysical model Nemirovskaya-Kocharovskaya suture zone of the Ukrainian Shield. Donetsk: Weber. [in Russian]
- 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]
- Belyavsky, V.V., Azarov, N.Y., Goshovsky, S.V., Chuprynkа, I.S., Shumlyansky, V.O. et al. (1999). Geoelectric model of gold deposits in the Ukrainian Shield and the Donets Basin. Kyiv: Znannya. [in Russian]
- Boychenko, S.A. (2000). Kominsky granite - structural and textural features, composition and genesis. In the collection "Geology and magmatism of Precambrian Sh.", Kyiv, 127-129. [in Russian]
- Burakhovich, T.K., Nikolaev, I.Yu., Sheremet, E.M., Shirkov, B.I. (2016). Anomalies in electrical conductivity according to the results of three-dimensional geoelectric modeling and minerals in the central part of the Ukrainian shield. *Bulletin of Perm University. Series "Geology"*, 3, 47-56. [in Russian]
- Geological state map of the crystalline base of the scale of 1 : 200 000. Sheet M-35-XVIII (Phastiv). (2003). Kiev: Foundation of GP "Ukrainian Geological Company". [in Russian].
- Ilyenko, 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 [in Ukraine]
- Kulik, S.N., Burakhovich, T.K. (2007). A three-dimensional crustal geoelectric model of the Ukrainian Shield. *Physics of the Solid Earth*, 4 (43), 284-289. [in Russian]
- Nikolaev, I.Yu., Kushnir, A.M., Ilyenko, V.A., Nikolaev, Yu.I. (2019). Electromagnetic studies of the western part of the Ukrainian shield. *Geofizicheskij zhurnal*, 3 (41), 120-133. [in Ukraine]
- Varentsov, I.M. (2013). Software system PRC_MTMV for data processing synchronous MT/MV soundings. *Materials of the VI All-Russian Workshop on EM sensing*. Novosibirsk, 1-4. [in Russian]

Надійшла до редколегії 26.12.19

V. Ilyenko, Senior Engineer,
E-mail: ivageophysicist@gmail.com;
T. Burakhovich, Dr. Sci. (Geol.),
E-mail: burahovich@ukr.net;
A. Kushnir, PhD (Geol.),
E-mail: antonn@ukr.net;
Institute of Geophysics NAS of Ukraine,
32 Palladina Ave., Kiev, 03680, Ukraine;
S. Popov, PhD (Geol.),
E-mail: 814614@ukr.net;
O. Omelchuk, PhD (Geol.-Min.),
E-mail: msstesha@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

MAGNETOTELLURIC AND MAGNETOVARIAE RESEARCHES IN THE ENDOCONTACT AREA OF KORINISKY GRANITE ARRAY

In 2018-2019, work was carried out to study the deep geoelectric structure of a complex system of intersection of the sub-latitudinal zone between the Andrushevsky and Masherinsky faults and the sub-meridional between Brusilovsky and Olshansky. Plane synchronous observations of the low-frequency natural electromagnetic field of the Earth of ionospheric-magnetospheric origin in a wide range of periods are made.

The transmission operators of MT/MV fields were evaluated using the PRC-MTMV software package. The obtained tipper estimates for periods of geomagnetic variations from 50 to 3100 s, curves of apparent resistance and impedance phases from 20 to 10000 s.

According to the interpretation of the results of magnetotelluric studies, the Brusilovsky deep fault in the form of a subvertical surface low-resistance anomaly was clearly recorded. Analyzing these and previous works, it can be stated that within the Volyn megablock Ukrainian shield, the Brusilovsky deep fault is manifested by an anomalous highly conductive structure from the surface. Within the framework of the Rosinsky megablock, the Brusilov fault zone is not completely anomalous, and only its individual components (Velikoerchik fault) are anomalous, its conductivity decreases almost four times.

The western border of the Korninsky massif is less clearly distinguished, as the relatively electrically conductive from the surface, which is most likely associated with the surface conductivity of minor sedimentary deposits or fracturing of rocks in the crystalline basement.

It should also be emphasized that on pseudo-sections of magnetotelluric parameters, the SUS point (picket 14 km) did not appear to be anomalous, but the behavior of the curves for different polarizations, and especially low magnetovariational characteristics, may indicate that the deep structure of the region must be classified as heterogeneous. Moreover, this point is located near the zone of metasomatically altered rocks and multidirectional faults of low rank. One explanation of this may be that the processes of secondary changes in granitoids do not lead to an increase in porosity, the solutions which are filtered are immediately saturated with calcium and alkalis, filling the fluid flow paths.

Keywords: magnetotelluric and magnetovariate methods, conductivity anomalies, fault zones, metasomatic zones.

В. Ильенко, вед. инж.,
E-mail: ivageophysicist@gmail.com;
Т. Бурахович, д-р геол. наук,
E-mail: burahovich@ukr.net;
А. Кушнир, канд. геол. наук,
E-mail: antonn@ukr.net;
Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
пр. Палладина 32, г. Киев, 03680, Украина;
С. Попов, канд. геол. наук,
E-mail: 814614@ukr.net;
О. Омельчук, канд. геол.-минералог. наук,
E-mail: msstesha@ukr.net;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

МТ/МВ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЗОНЕ ЕНДОКОНТАКТА КОРНИНСКОГО ГРАНИТНОГО МАССИВА

В 2018–2019 годах проводились работы по изучению глубинного геоэлектрического строения сложной системы пересечения субширотной зоны между Андрушевским и Машеринским разломами и субмеридиональной – между Брусиловским и Ольшанским разломами. Выполнены площадные синхронные наблюдения низкочастотного естественного электромагнитного поля Земли ионосферно-магнитосферного происхождения в широком диапазоне периодов.

Было проведено оценивание передающих операторов МТ/МВ полей, посредством применения программного комплекса PRC-MTMV. Полученные оценки типпера для периодов геомагнитных вариаций от 50 до 3100 с, а также кривые кажущегося сопротивления и фаз импеданса от 20 до 10000 с.

При интерпретации результатов магнитотеллурических исследований был четко зафиксирован Брусиловский глубинный разлом в виде субвертикальной поверхностной низкоомной аномалии. Анализируя эти и предыдущие работы, можно констатировать, что в пределах Волынского мегаблока УЩ Брусиловский глубинный разлом проявляется аномальной, высокопроводящей с поверхности, структурой. В рамках Росинского мегаблока Брусиловская зона разломов не является полностью аномальной – только ее отдельная составляющая (Великоерчиковский разлом) является аномальной, ее проводимость уменьшается почти в четыре раза.

Менее четко выделяется относительно электропроводящая с поверхности западная граница Корнинского массива, которая скорее всего связана с поверхностной проводимостью маломощных осадочных отложений или трещиноватостью пород кристаллического фундамента.

Также следует подчеркнуть, что на псевдоразрезах магнитотеллурических параметров пункт SUS (пикет 14 км) не проявился как аномальный, но поведение кривых для различных поляризаций и особенно низкие магнитовариационные характеристики могут свидетельствовать о том, что глубинное строение района необходимо отнести к неоднородному. Тем более, что этот пункт расположен вблизи зоны метасоматически измененных пород и разнонаправленных разломов низкого ранга. Одним из объяснений этого может быть то, что процессы вторичных изменений в гранитоидах не приводят к повышению пористости, поскольку растворы, которые фильтруются, сразу насыщаются кальцием и щелочами, заполняя пути продвижения флюидов.

Ключевые слова: магнитотеллурические и магнитовариационные методы, аномалии электропроводности, зоны разломов, зоны метасоматоза.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.98:550.8

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.08>В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vladvam@gmail.com;О. Карпенко, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: karpenko.geol@gmail.com;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, УкраїнаПЕРСПЕКТИВИ НЕТРАДИЦІЙНОЇ НАФТОГАЗОНОСНОСТІ
ПІВДЕННОЇ ПРИБОРТОВОЇ ЗОНИ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

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

На основі аналізу численних робіт і публікацій, вивчення керна свердловин, переінтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин, дослідження геохімічних особливостей і ступеня термальної переробки нафтогазовмісних товщ визначено перспективи нетрадиційної нафтогазоносності геологічних структур Зачепилівсько-Лівенцівського валу південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), яка відповідає Руденківсько-Пролетарському нафтогазоносному району. На основі проведених досліджень доведено, що термальна зрілість порід південної прибортової зони в межах Зачепилівсько-Лівенцівського валу є вкрай нерівномірною як за площею, так і у розрізі, і лише на окремих ділянках (свердловина Багатойська-25, Керносівська-2) або на глибинах понад 1500 м (свердловина Зачепилівська-100), чи навіть 2700 м (свердловина Улянівська-18), сягає прийнятних величин, достатніх для газоутворення. Тому, незважаючи на достатньо високий вміст S_{org} , який, як правило, значно перевищує 1–2 %, перспективність цієї ділянки південної прибортової зони ДДЗ щодо відкриття великих покладів сланцевого газу чи газу уціільнених порід є вельми проблематичною. Найбільш перспективною ділянкою цієї частини південної прибортової зони щодо комплексу показників, які характеризують потенційно газовмісні сланцеві породи, є район св. Багатойська-25 і Керносівська-2. Прогнозні ресурси сланцевого газу цієї ділянки можуть бути попередньо оцінені в 40–50 млрд м³. Це треба враховувати при плануванні подальших геологорозвідувальних робіт на сланцевий газ. З аналізу даних можна виділити інтервали глибин, на яких збагачені органікою породи здатні генерувати нафту – від 900 до 3100 м, жирний газ з конденсатом – від 2100 до 4000 м і сухий газ – від 2300 до глибше 4000 м.

Ключові слова: сланцевий газ, уціільнений колектор, нафтогазоносний басейн, ресурси, геофізичні дослідження свердловин.

Постановка проблеми. Проблема пошуків нетрадиційних джерел вуглеводнів, насамперед сланцевого газу і газу уціільнених порід-колекторів, пов'язана з поступовим виснаженням традиційних родовищ нафти і газу. Успішні дослідження цієї проблеми вже призвели до суттєвого збільшення видобутку природного газу в США і Канаді, дослідження в цій сфері розвиваються у багатьох країнах світу (Австралія, Китай, Німеччина, Російська Федерація, Велика Британія, Швеція, Польща тощо) (Ambrose et al., 2009; Castillo et al., 2012; EIA Analysis..., 2011; Hadro, 2010; Kuuskraa et al., 2011; Landa, 2012; U.S. Geological..., 2012). Поки що Україна багато в чому залишалася в стороні від цього процесу, хоча вже з 2010 р. НАК "Нафтогаз України" проводить дослідження щодо пошуків сланцевого газу та інших нетрадиційних джерел вуглеводнів в Україні з метою нарощування енергетичної бази нашої держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати цих робіт віддзеркалені в численних науково-виробничих звітах і наукових публікаціях (Вижва та ін., 2014; Загнітко та Михайлов, 2014; Лукин, 2010^{1,2}, 2011; Михайлов та ін., 2011, 2014; Михайлов та Ємець, 2014; Михайлов та Загнітко, 2015; Нетрадиційні джерела..., 2014¹⁻⁸; Vyzva and Mikhailov, 2013). Цими дослідженнями визначено основні геологічні критерії оцінки перспектив газонасності сланцевих порід, виділено перспективні стратиграфічні комплекси нафтогазоносних регіонів (НГР) України, проведено оцінку ресурсів сланцевого газу і сланцевої нафти в їхніх межах, виділено ділянки для проведення подальших геологорозвідувальних робіт (ГРР), розроблено стратегію пошуків сланцевого газу та інших нетрадиційних ресурсів вуглеводнів в Україні. Результати досліджень засвідчують значні перспективи відкриття родовищ сланцевого газу та інших нетрадиційних джерел вуглеводнів у межах Східного, Західного та Південного НГР. Під час підготовки статті проведено аналіз численних робіт, присвячених особливостям геологічної будови, стратиграфії, нафтогазоносності Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), зокрема її південної прибортової зони (Бенько і др., 2005; Вертюх, 2007, 2018; Карпенко, 2017, 2018; Несіна та ін., 2012).

Виділення нероз'язаних раніше частин загальної проблеми. Невирішеним залишається питання щодо прогнозу оцінки тієї частини південної прибортової зони ДДЗ, яка відповідає Руденківсько-Пролетарському нафтогазоносному району стосовно нетрадиційних скопіння нафти і газу.

Формулювання цілей статті. Об'єктом досліджень є геологічні структури та формації південно-східного флангу Зачепилівсько-Лівенцівського валу, перспективні на виявлення нетрадиційних покладів вуглеводнів. Основною метою роботи було оцінити перспективність цієї частини південної прибортової зони ДДЗ на поклади сланцевого газу і газу уціільнених порід-колекторів.

Геологічна будова південної прибортової зони ДДЗ. ДДЗ є частиною однойменної нафтогазоносної галузі. Її загальна площа 101,8 тис. км². Серед нафтогазоносних структур України за розвіданими запасами, потенційними ресурсами і видобутком вуглеводнів (ВВ) вона посідає провідне місце. ДДЗ виповнена потужною товщею осадових порід від середньодевонських до четвертинних. Для них характерний різноманітний літологічний склад і широкий набір фаціальних обстановок – від морських (аргіліти, алевроліти, пісковики, вапняки) до лагунних (вапняки, сіль, крейда, ангідрити) і континентальних (вугілля, строкатобарвні породи). Глибини залягання підшви осадової товщі збільшуються у напрямку з північного заходу на південний схід, а також від бортів до її осьової частини, що призводить до поступового зменшення потужностей порід і чітко простежується на регіональних профілях. Максимальна товщина відкладів у найбільш занурених частинах западини досягає 15–17 км. У ДДЗ установлена промислова продуктивність палеозойських і мезозойських утворень. Переважна більшість родовищ нафти і газу зосереджена в палеозойських відкладах. ДДЗ характеризується поздовжньою і поперечною зональністю, основними структурними елементами є поздовжні зони: приосьова, південна та північна прибортові, південний та північний борти.

Предметом досліджень є та частина південної прибортової зони ДДЗ, яка відповідає Руденківсько-Пролетарському

нафтогазоносному району. Основною структурою району є Зачепилівсько-Левенцівський вал, який простежується вздовж крайового розлому на відстань понад 150 км, від Зачепилівського нафтогазоконденсатного до Левенцівського газоконденсатного родовища. До нього приурочені більш дрібні структури (Горобцівська, Зачепилівська, Лимарська та ін.). Крім того, виділяються структури, що приурочені до Михайлівсько-Голубівського валу (Новомиколаївська, Гратівська, Гупалівська, Перещепинська, Багатойська та ін.), а також структури, які приурочені до крайового розлому (Юр'ївська, Ульяновська, Левенцівська та ін.).

Стратиграфічний розріз району складений утвореннями девонського, кам'яновугільного, пермського, мезозойського і кайнозойського віку, які зі структурною незгідністю перекривають глибокометаморфізовані породи кристалічного фундаменту, що було встановлено в ряді свердловин (напр., на Зачепилівській площі фундамент розкритий св. № 412 на глибині 4236 м, а св. № 13 – на глибині 1830 м).

Відклади нижнього карбону переважно представлені чорними і темно-сірими аргілітами, глинами, пісковиками, глинистими вапняками. Вважається, що турнейські

та візейські відклади формувалися переважно в морських умовах, а серпуховські – в умовах узбережно-морських заболочених рівнин, заток і прибережного моря.

Для відкладів середнього карбону характерне зростання товщини від бортів до осової частини западини. Башкирський ярус у нижній частині представлений пачкою піщано-глинистих відкладів, перекритою потужною (50–400 м) глинисто-карбонатною морською товщею ("башкирська плита"), а у верхній (100–1500 м) – циклічним перешаруванням пісковиків і глин з карбонатними і вуглистими прошарками. Московський ярус (150–1800 м) складений пісковиками і аргілітами з прошарками вапняків і вугілля.

Палеозой перекритий теригенними відкладами триасової (300–600 м), юрської (до 365 м), крейдової (до 140 м) систем і кайнозойськими відкладами (100–200 м).

Нафтогазоносність південної прибортової зони ДДЗ. У межах нафтогазоносного району відомо 30 родовищ вуглеводнів, переважно газоконденсатних (*Атлас родовищ...*, 1998). Переважна більшість покладів вуглеводнів приурочена до відкладів нижнього карбону: турнейських, візейських, серпуховських, хоча встановлена також нафтогазоносність відкладів девону, башкирського та московського ярусів середнього карбону і навіть юри (табл. 1). Продуктивні горизонти зустрічаються на глибинах від 500 до 6900 м.

Таблиця 1

Стратиграфічна приуроченість покладів вуглеводнів південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини

Родовище	Девон	Карбон					Юра
		Нижній відділ			Середній відділ		
		турнейський	візейський	серпуховський	башкирський	московський	
Мачуське ГК		+					
Лиманське НГК			+				
Горобцівське ГК			+	+			
Зачепилівське НГК		+	+	+			
Решетниківське ГН				+	+		+
Суходолівське НГК				+	+		
Руденківське ГК		+	+				
Степне ГК				+	+		
Новогригорівське НГК			+	+	+	+	
Розумівське ГК				+	+	+	
Гнатівське НГК		+	+				
Новомиколаївське (Мовчанівське) ГК		+					
Михайлівське Г			+				
Юр'ївське НГК			+				
Гупалівське ГК			+				
Дмухайлівське ГК		+					
Мусієнківське ГК			+				
Кременівське НГК			+	+	+		
Рясківське ГК		+					
Віноградівське ГК			+	+			
Новоселівське ГК			+	+	+		
Східно-Новоселівське НГК			+	+	+		
Личківське НГК	+						
Пролетарське ГК			+	+	+	+	
Перещепинське ГК		+	+	+	+		
Голубівське НГ			+	+			
Східно-Голубівське ГК		+			+		
Багатойське ГК	+	+		+			
Катеринівське ГК					+		
Левенцівське ГК				+	+		

Поклади вуглеводнів, як правило, пластові й пластово-склепінні, тектонічно- та літологічно екрановані, пов'язані з брахіантикліналями, де найчастіше приурочені до пластів пісковиків, рідше карбонатів. Зустрічаються багатопластові поклади, пов'язані із соляними структурами.

Що стосується проблеми нетрадиційних покладів вуглеводнів у цьому районі, то з цієї точки зору авторами

були проведені дослідження нафтогазовмісних товщ Зачепилівської структури (свердловини Зачепилівська-90, 100), а також ряду структур за простяганням Зачепилівсько-Левенцівського валу (свердловини Ливенська-1, 3, 7; Личківська-64; Ульяновська-18; Багатойська-25; Західно-Левенцівська-1, 2; Керносівська-1, 2) (рис. 1).

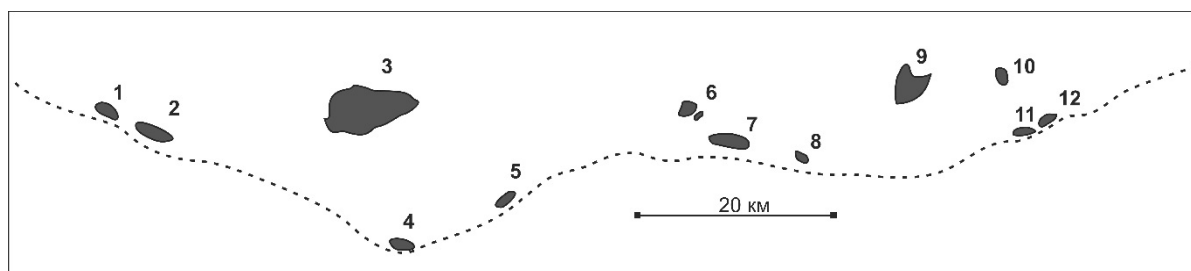


Рис. 1. Схема розміщення родовищ вуглеводнів, наведених у статті.

Пунктирна лінія – границя південного борту ДДЗ. Родовища: 1 – Лиманське, 2 – Зачепилівське, 3 – Руденківське, 4 – Ливенське, 5 – Юр'ївське, 6 – Личківське, 7 – Пролетарське, 8 – Ульяновське, 9 – Багатовське, 10 – Керносівське, 11 – Західно-Левенцівське, 12 – Левенцівське

Нами було детально вивчено особливості геологічної будови Зачепилівського родовища, яке розміщується у межах Зачепилівсько-Левенцівського валу в південній прибортовій частині ДДЗ. Формування валу тісно пов'язано з Південним крайовим порушенням. Глибина залягання ранньодокембрійського фундаменту різко збільшується у північно-східному напрямку від 1,5 до 4,5 км, при цьому амплітуда крайового порушення за даними буріння може перевищувати 2,5 км. Загалом на формування структур осадового чохла впливали як блокові рухи фундаменту, так і солянокупольна тектоніка.

Кристалічний фундамент представлений метаморфізованими сланцюватими пісковиками і хлорит-серицитовими сланцями раннього докембрію. Зі структурною незгідністю вони перекриті відкладами франського і фаменського ярусів девону, у складі якого виділяють горизонти:

- **воронезький** ($D_3 fr_3 vr$) – чергування пісковиків, аргілітів, мергелів, глинистих вапняків (на свіжому зламі у кернах часто відчувається запах ВВ) – 702 м;
- **євланівсько-лівенський** ($D_3 fr_3 ev-lv$) (нижня сольова товща) – галіт із прошарками доломітів, аргілітів, алевролітів, карбонатів – 365 м;
- **законсько-єлєцький** ($D_3 fm_1 zd-el$) – перешарування пісковиків і конгломератів, рідше алевролітів, гравелітів, аргілітів, ефузивів і вапняків (мають запах нафти) – 290 м;
- **єлєцько-лебедянський** ($D_3 fm_1 el-lb$) – кам'яна сіль із прошарками глин, мергелів, ангідритів, аргілітів, пісковиків, доломітів, доломітизованих вапняків – 570 м;
- **данково-лебедянський** ($D_3 fm_2 dn-lb$) – переверстування строкатих пісковиків, гравелітів, конгломератів – 220 м;
- **озерсько-хованський** ($D_3 fm_2 oz-hv$) (лиманська і руденківська світи) – карбонатна товща: лиманські шари – вапняки із прошарками аргілітів; руденківські шари – криїдні вапняки і пісковики – 573 м.

Кам'яновугільна система представлена відкладами нижнього і середнього відділів, у складі яких виділяють яруси:

- **турнейський** ($C_1 t$) – піщано-глиниста товща (пісковики, алевроліти, аргіліти, вапняки); карбонатна (вапняки із прошарками пісковиків і вуглистих аргілітів) і теригенна (пісковики із прошарками алевролітів і аргілітів) пачки – 380–450 м;
- **візейський** ($C_1 v$) – у складі під'ярусів:
 - **нижньовізейського** (C_{1v1}) – темно-сірі до чорних вуглисті аргіліти, пісковики, чергування вапняків і вапнякових пісковиків, у верхній частині – 45-метровий пласт пісковика (продуктивний горизонт В-15) – 59–275 м;
 - **верхньовізейського** (C_{1v2}) – чорні аргіліти, алевроліти із прошарками пісковиків і вапняків; перешарування пісковиків, алевролітів, аргілітів – 235–366 м;
- **серпуховський** ($C_1 s$) – у складі під'ярусів:
 - **нижньосерпуховського** (C_{1s1}) – аргіліти та алевроліти з вуглистими і піритизованими рослинними рештками, рідкісні пласти пісковиків і вапняків – 301–425 м;
 - **верхньосерпуховського** (C_{1s2}) – аргіліти, прошарки пісковиків, вапняків, мергелів, бурого вугілля; зверху перешарування пісковиків, вуглистих алевролітів, аргілітів, зрідка вапняків – 80–143 м;
- **башкирський** ($C_2 b$) – аргіліти із прошарками вапняків, вугілля, пісковиків – 149–699 м.

Палеозой перекритий теригенними відкладами тріасової (350–603 м), юрської (до 365 м), крейдової (до 140 м) систем і кайнозойськими відкладами (120–210 м).

Установлено, що інт. 955–983 м серпуховського ярусу в св. Зачепилівська-90 складений перспективними щодо сланцевого газу чорними сланцями, дуже збагаченими органічною речовиною (ТОС – 5,60–12,24 %) (табл. 2), але низький ступінь їхнього термального перетворення (R_o – 0,47–0,68) не дозволяє оцінювати цей інтервал як перспективний (табл. 3).

Таблиця 2

Результати термічного аналізу проб порід південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини

№ пр.	Інтервал, м	Вік	Температурні межі, С°				ТОС, %
			< 120 С°	120–300 С°	300–390 С°	390–550 С°	
Св. Зачепилівська-90							
132 3Ч	971–975	C _{1s}	1,17248	0,63127	0,51075	4,46438	5,60640
131 3Ч	983–979	C _{1s}	1,29302	0,98099	1,02651	10,22903	12,23653
Св. Зачепилівська-100							
133 3Ч	1270–1278	C _{1s1}	0,64059	0,13806	0,35412	2,71058	3,20276
134 3Ч	1435–1443	C _{1v}	0,67054	0,20435	0,29333	2,62647	3,12415
21 3А		C _{1v}	0,57614	0,35457	0,09007	1,43360	1,87824
22 3А	1590–1598	C _{1v}	1,59221	1,33701	0,87216	3,29415	5,50332
23 3А	1680–1688	C _{1t}	0,18679	0,43530	0,14467	1,56453	2,14450
23-1 3А	1680–1688	C _{1t}	0,03330	0,25087	0,10818	1,17542	1,53447
24 3А	1688–1695	C _{1t}	0,21222	0,48605	0,24631	1,31914	2,0515
25 3А	1750–1758	C _{1t}	0,33469	0,08502	0,12139	2,30255	2,50896

Таблиця 3

Результати виміру відбивної здатності вітриніту порід південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини

Свердловина	Проба	Інтервал	Індекс	Порода	Кількість замірів	Середнє
Зачепилівська-90	132 ЗЧ	971–975	C ₁ s	Сланець	17	0,68
	131 ЗЧ	983–979	C ₁ s	Сланець	5	0,47
Зачепилівська-100	133 ЗЧ	1270–1278	C ₁ s ₁	Аргіліт	8	0,61
	134 ЗЧ	1435–1443	C ₁ v	Аргіліт	7	0,75
	23-3А	1680–1688	C ₁ t	Алевроліт	14	1,10
	24-3А	1688–1695	C ₁ t	Алевроліт	12	1,74
	25-3А	1750–1758	C ₁ t	**	7	1,29
Ливенська-7	ЛІВ-7	3120	C ₁ v ₁	Аргіліт	21	0,7
Ливенська-1	ЛІВ-8	1720–1728	C ₁ v ₁	Пісковик	30	0,5
	ЛІВ-10	1999–2008	D ₃ fm ₂	Пісковик	17	0,5
Личківська-64	ЛИЧ-1	2630–2638	C ₁ s ₁	Пісковик	26	0,8
	ЛИЧ-2	2885–2892	C ₁ v	Алевроліт	32	0,9
Ульянівська-18	УЛ-1	2325–2340	C ₁ s ₁	Аргіліт	38	0,6
	УЛ-7	2544–2557	C ₁ s ₁	Алевроліт	31	0,8
	УЛ-6	2715–2723	C ₁ v ₂	Аргіліт	49	1,2
Багатойська-25	БАГ-6	3708–3716	C ₁ s ₂	Аргіліт	24	1,2
	БАГ-3	3981–3989	C ₁ s ₁	Аргіліт	34	1,2
	БАГ-8	4335–4342	C ₁ v ₂	Аргіліт	33	1,4
Західно-Левенцівська-1	З-Л-1	946–954		Аргіліт	35	0,7
	З-Л-2	1540–1548	C ₁ s ₁	Пісковик	39	0,8
Західно-Левенцівська-2	З-Л-5	1420–1428	C ₁ s ₁	Аргіліт	33	0,8
Керносівська-2	КЕР-4	1779–1786	C ₁ s ₂	Алевроліт	20	0,9
	КЕР-5	2153–2158	C ₁ s ₁	Аргіліт	59	1,1

** Перешарування чорних аргілітів, алевролітів і дрібнозернистих пісковиків.

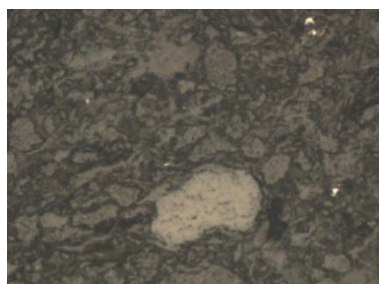
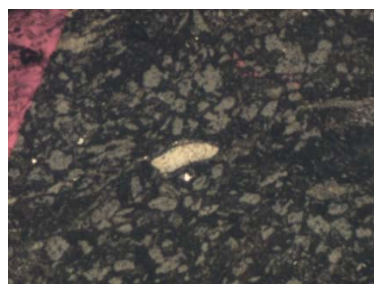
Водночас у св. Зачепилівська-100 за результатами вивчення керн, проведення аналізів і переінтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин (ГДС) в інтервалі 1400–1610 м виділена потужна (210 м) товща турнейсько-візейських відкладів, представлених переважно глинистими породами з підвищеними значеннями ОР (ТОС = 1,5–5,5 %) і достатнім ступенем термічної зрілості порід ($R_o = 0,75–1,74$). Прогнозні ресурси газу категорії D₂ оцінені в 210 млрд м³ (Нетрадиційні джерела..., 2014^{4,8}). Звертає увагу, що і у св. Зачепилівська-100 верхня частина розрізу до глибини близько 1500 м характеризується низьким ступенем термального перетворення ($R_o = 0,50–0,84$).

Ступінь термальної переробки порід. Для уточнення ступеня термальної переробки порід у межах південної прибортової зони ДДЗ було проведено вивчення відбивної здатності вітриніту, описано аншліфи порід св. Ливенська-1, 7, Личківська-64, Ульянівська-18, Багатойська-25, Західнолевенцівська-1, 2, Керносівська-2. Згідно із результатами досліджень вітриніт у палеозойських відкладах південної прибортової зони ДДЗ представлений здебільшого мацералами вітродетриніту – тонкофрагментованими вітринізованими рослинними рештками, які зустрічаються окремо чи зцементовані аморфним вітринітовим матеріалом. Менш розповсю-

джені мацерали колотеленіту, коловітриніту, колодетриніту, вітриніту, фюзеніту, детриніту, зовсім зрідка – теловітриніту і геловітриніту (рис. 2–10).

У свердловинах південної прибортової зони ДДЗ зафіксовано нерівномірний ступінь термальної переробки порід. У св. Ливенська-1, 7 відбивна здатність вітриніту не перевищує 0,5–0,7 % для відкладів девону і візе; у св. Західнолевенцівська-1, 2 – 0,7–0,8 % для відкладів серпуховського ярусу, у св. Личківська-64 – 0,9 % для відкладів візейського ярусу і 0,8 % для відкладів серпуховського ярусу; у св. Ульянівська-18 – 1,2 % для відкладів візе і 0,6–0,8 % – для відкладів серпухова. Разом із тим, у св. Багатойська-25 відклади як візейського, так і серпуховського ярусів карбона мають достатній ступінь термічної переробки (R_o 1,2–1,4), а у св. Керносівська-2 відбивна здатність вітриніту дорівнює 0,9–1,1 % для відкладів серпуховського ярусу. Таким чином, найбільш перспективною ділянкою південної прибортової зони (із вивчених нами) є район св. Багатойська-25 і Керносівська-2. Це треба враховувати при плануванні подальших геологорозвідувальних робіт на сланцевий газ.

Загалом, середні значення відбиття вітриніту в заміряних зразках південної прибортової зони ДДЗ коливаються від 0,5 %, що відповідає недозрілій органіці, до 1,4 %, що характеризує дозрілу органічну речовину.

Рис. 2. Вітриніт. Аншліф ЛІВ-10, св. Ливенська-1, інт. 1999–2008, D₃fm₂, аргілітРис. 3. Вітродетриніт. Аншліф КЕР-5, св. Керносівська-2, інт. 2153–2158, C₁s₁, аргілітРис. 4. Фюзеніт, колотеленіт, пірит. Аншліф ЗЛ-2, св. Західнолевенцівська-1, інт. 1540–1548, C₁s₁, пісковик

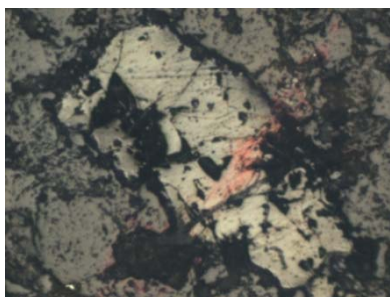


Рис. 5. Колотелініт. Аншліф БАГ-3, св. Багатовська-25, інт. 3981–3989, C_{1V_2} , вуглисті аргіліт

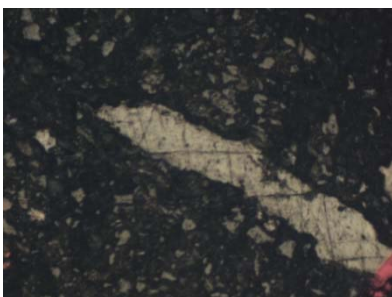


Рис. 6. Колодетриніт. Аншліф БАГ-8, св. Багатовська-25, інт. 4335–4342, C_{1V_1} , аргіліт

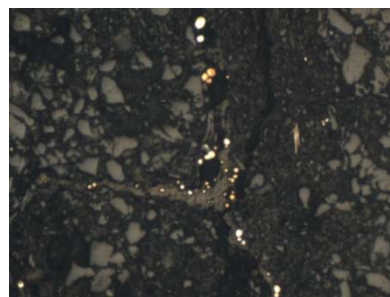


Рис. 7. Колодетриніт, гелініт, глобулярний пірит. Аншліф ЗЛ-5, св. Західно-Левенцівська-2, інт. 1420–1428, C_{1S_1} , аргіліт



Рис. 8. Колодетриніт, вітродетриніт. Аншліф ЗЛ-1, св. Західно-Левенцівська-1, інт. 946–954, C_{1S_1} , аргіліт

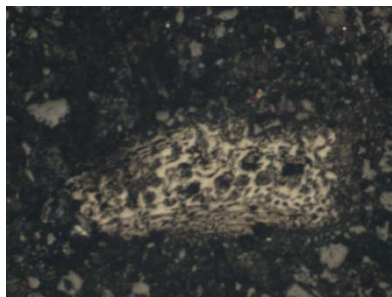


Рис. 9. Фюзеніт, вітродетриніт. Аншліф ЗЛ-5, св. Західно-Левенцівська-2, інт. 1420–1428, C_{1S_1} , аргіліт



Рис. 10. Детриніт, гематит. Аншліф ЛІВ-8, св. Ливенська-1, інт. 1720–1728, C_{1V_1} , пісковик

З аналізу даних можна виділити інтервали глибин, на яких збагачені органікою породи здатні генерувати нафту – від 900 до 3100 м, жирний газ з конденсатом – від 2100 до 4000 м і сухий газ – від 2300 до глибше 4000 м.

Геохімічні особливості порід і газів. Основними типами порід, що містять ущільнений (сланцевий) газ, є

глинисті та алевритові сланці різного мінерального складу. Головними мінералами таких порід є монтморилоніт, каолінит, хлорит, гідроксиди, кварц, опал, карбонати, інколи рудні мінерали та бітуми. Геохімічні особливості порід південної прибортової зони ДДЗ наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Геохімічні особливості порід південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини

№ проби	Інтервал, м	Індекс	Порода	C_{org} , %	H_2O , %	$U \cdot 10^{-4}$, %	$CO_{2карб.}$, %
Свердловина Зачепилівська-90							
13-3А	971–975	C_{1S}	Аргіліт	9,80	2,76	4,3	0,16
132-3С	971–975	C_{1S}	Сланець	10,27	2,27	4,8	0,88
131-3С	983–979	C_{1S}	—	23,74	2,53	6,1	0,88
Свердловина Зачепилівська-100							
133-3С	1270–1278	C_{1S_1}	Аргіліт	4,28	1,37	3,9	1,21
134-3С	1435–1443	C_{1V}	Аргіліт	4,04	1,45	4,2	0,88
4-3С	1680–1688	C_{1t}	Вапняк	4,58	2,76	2,5	4,95
Свердловина Ливенська-3							
Лів-15	1550–1558	C_{1V_2}	Вапняк	6,60	2,70	9,8	3,85
Лів-13	1640–1648	C_{1V_2}	—	6,06	2,38	7,8	8,80
Свердловина Личківська-64							
Лич-3	2885–2892	C_{1V}	Алевроліт	4,70	1,64	3,7	0,41
Свердловина Ульяновська-18							
Ул-2	2325–2340	C_{1S_1}	Аргіліт	10,36	2,04	7,4	0,16
Свердловина Багатовська-25							
14*	3294–3301	C_{1S}	Аргіліт	5,38	1,18	3,7	0,34
15*	3708–3712	C_{1S}	Алевроліт	5,16	1,20	3,3	0,33
16*	3825–3833	C_{1V_2}	Аргіліт	3,94	0,80	3,1	0,05
Баг-5	3825–3833	C_{1S_2}	—	4,32	1,00	3,3	0,11
Баг-7	3825–3833	C_{1S_2}	—	2,58	0,94	2,7	0,33
17*	3981–3989	C_{1V_2}	Пісковик	1,38	0,24	1,9	0,14
18*	4157–4163	C_{1V_2}	Аргіліт	3,02	0,52	2,8	0,05
19*	4335–4342	C_{1V_2}	Мергель	4,82	1,10	9,8	6,32
20*	4378–4386	C_{1V_1}	Вапняк	2,84	0,84	4,9	16,64
Баг-11	4378–4386	C_{1V_1}	—	2,60	1,68	5,2	2,75
Баг-13	4523–4531	C_{1t}	Аргіліт	1,20	0,66	0,8	23,1
Свердловина Керносівська-1							
31*	2954–2961	C_{1V_2}	Аргіліт	3,62	0,60	3,2	0,69
32*	3004–3011	C_{1V_2}	—	2,72	0,64	3,0	0,05
33*	3270–3277	C_{1V_2}	—	4,88	0,56	3,4	0,05
34*	3466–3472	C_{1V_2}	—	7,90	2,12	4,6	2,75

№ проби	Інтервал, м	Індекс	Порода	C _{орг.} , %	H ₂ O ⁺ , %	U·10 ⁻⁴ , %	CO _{2карб.} , %
35*	3472–3478	C _{1v2}	Вапняк	6,92	1,30	7,1	7,15
Кер-13	3472–3478	C _{1v}	Аргіліт	7,12	1,88	5,2	4,40
Кер-16	3900–3903	C _{1t}	Вапняк	1,70	0,98	1,4	30,52
36*	3903–3906	C _{1t}	—	2,32	0,80	1,7	35,75
Свердловина Керносівська-2							
Кер-2	1612–1619	C _{1s2}	Аргіліт	3,48	1,46	3,8	1,10
Кер-6	2153–2158	C _{1s1}	—	4,10	1,04	3,8	0,38
Кер-9	2609–2616	C _{1s1}	Вапняк	5,20	1,04	5,1	0,41
Кер-11	3860–3864	?	—	2,78	0,72	1,0	26,4
Свердловина Веселівська-300біс							
21*	3617,8–3624,5	C _{2m}	Аргіліт	4,14	0,96	3,3	0,05
22*	3713–3717	C _{2m}	—	5,64	1,58	5,2	< 0,05
23*	3758–3761	C _{2m}	Алевроліт	4,64	0,78	4,3	1,10
24*	3818–3824	C _{2m}	—	3,80	0,52	4,5	0,69
Свердловина Комишеваська-4							
37*	1442–1428	C ₃	Алевроліт	2,86	1,22	4,3	0,05
38*	1448–1458	C ₃	—	4,64	1,24	4,9	0,05
39*	1937–1945	C _{2m}	Аргіліт	4,90	1,06	5,0	0,05
40*	2293–2302	C _{2m}	—	12,58	0,64	6,3	2,75
41*	2303–2307	C _{2m}	—	2,56	1,04	3,7	< 0,05
42*	2981–2988	C _{2b}	Алевроліт	2,10	0,94	2,4	< 0,05
43*	3380–3390	C _{1s}	Аргіліт	6,44	0,76	3,7	0,22
44*	3390–3398	C _{1s}	—	5,26	0,96	3,0	0,05
45*	3610–3620	C _{1v2}	—	4,82	0,80	3,1	< 0,05
46*	3620–3631	C _{1v2}	Алевроліт	4,48	0,76	3,0	0,33
47*	3795–3807	C _{1v1}	Аргіліт	4,82	0,68	2,7	8,52
48*	3807–3816	C _{1v1}	—	4,32	0,80	2,4	< 0,05
49*	3816–3822	C _{1v1}	—	4,46	0,68	2,1	< 0,05
50*	4325–4332	D ₃	—	5,54	0,80	2,5	0,22
51*	4341–4350	D ₃	—	3,88	0,58	2,3	0,05

* Проби зі звіту В.В. Огаря (2012 р.).

Звертає увагу на себе збагаченість досліджених порід C_{орг.} та C_{карб.}. Перший показник характеризує валовий вміст керогена, а другий – карбонатних мінералів. Як видно з таблиці, вміст керогена, як правило, значно перевищує граничні показники в 1–2 %, сягаючи в деяких пробах 10–12 % (зокрема у пробах Зачепилівської та Комишеваської площ). У досить монотонно розподілений у

сланцевих товщах і зазвичай міститься в кількостях, значно вищих за нижню межу його виявлення. Діапазон вмісту урану становить від 0,8 до 9,8 × 10⁻⁴ %.

Для вивчення складу газів зразків перспективних інтервалів Зачепилівської площі було проведено газово-пірохроматографічний аналіз на газовому хроматографі ЛХМ-8Мд з детектором теплопровідності; газ-носії – гелій, сорбент – полісорб-1, температура піролізу – 250, 450 і 650°C (табл. 5).

Таблиця 5

Результати визначення складу газів методом піролізу. Свердловина Зачепилівська-90.
Зразок 132 3Ч (971–975 м). Чорний сланець. Наважка 0,265 г

Компоненти	Об'єм продуктів піролізу, мкл/г	Маса продуктів піролізу, мкг/г					Масова частка компонентів, %
	Температурні межі, °C						
	50–850	50–250	250–450	450–650	650–850	50–850	
H ₂	7164,45	–	6,95	193,36	444,50	644,80	0,064480
N ₂	11,25	12,09	–	1,98	–	14,08	0,001408
CO	5731,44	15,85	293,21	1141,13	5714,11	7164,30	0,716430
CH ₄	4856,39	0,39	205,13	2140,39	1136,12	3482,03	0,348203
CO ₂	4958,82	349,50	1485,39	1258,21	6710,47	9803,58	0,980358
H ₂ O	35,06	9419,83	11740,98	5990,94	7911,85	35063,61	3,506361
C ₂ H ₄	232,95	–	45,25	229,71	18,56	293,52	0,029352
C ₂ H ₆	411,95	–	107,88	437,12	14,01	559,01	0,055901
NO	–	–	–	–	–	–	–
H ₂ S	1230,28	–	39,64	1268,37	585,40	1893,41	0,189341
SO ₂	–	–	–	–	–	–	–
COS	–	–	–	–	–	–	–
CS ₂	778,87	–	246,49	1025,40	–	1271,89	0,127189
C ₃ H ₆	–	–	–	–	–	–	–
C ₃ H ₈	54,34	–	109,71	–	–	109,71	0,010971
C _n H _m	25,66	–	69,28	–	–	69,28	0,006928
Сума	22757,41	9797,68	13731,66	10726,02	21917,05	56172,40	5,617240

Не виявлено: N₂O, NH₃, F₂, O₂.

Дуже газонасичена проба, зокрема відновними газами, особливо воднем і метаном (вміст метану сягає майже 0,35 % за масою від кількості всього матеріалу і

майже третину від усіх відновних газів), містить досить високу частку важких, у тому числі маслянистих гомологів, що дозволяє прогнозувати високу перспективність як газо-, так і нафтоносності таких товщ.

Висновки. За результатами проведеного аналізу фактичного матеріалу лабораторних досліджень керна з потенційно сланцевих товщ розрізів нафтогазових родовищ у свердловинах південної прибортової зони ДДЗ зафіксовано нерівномірний ступінь термальної переробки порід.

Зокрема доведено, що термальна зрілість порід південної прибортової зони в межах Зачепилівсько-Левенцівського валу є вкрай нерівномірною як за площею, так і в розрізі й лише на окремих ділянках (свердловини Багатойська-25, Керносівська-2) або на глибинах понад 1500 м (свердловини Зачепилівська-100), чи навіть 2700 м (свердловина Ульянівська-18), сягає прийнятних величин, достатніх для газоутворення. Тому, незважаючи на достатньо високий вміст S_{org} , який, як правило, значно перевищує 1–2 %, перспективність цієї ділянки південної прибортової зони ДДЗ щодо відкриття великих покладів сланцевого газу чи газу ущільнених порід є величезною проблематичною. Скоріш за все, тут не слід очікувати великих покладів нетрадиційного газу, які мають значну товщину, хоч локальні лінзоподібні поклади товщиною до декількох десятків метрів можуть мати місце. Особливо це стосується району свердловин Багатойська-25 і Керносівська-2. Прогнозні ресурси сланцевого газу цієї ділянки за аналогією з подібними структурами відомих сланцевих басейнів світу можуть бути попередньо оцінені в 40–50 млрд m^3 .

Таким чином, найбільш перспективною ділянкою південної прибортової зони (із вивчених нами) щодо комплексу показників, які характеризують потенційно газовмісні сланцеві породи, є район св. Багатойська-25 і Керносівська-2. Це треба враховувати при плануванні подальших геологорозвідувальних робіт на сланцевий газ. З аналізу даних можна виділити інтервали глибин, на яких збагачені органікою породи здатні генерувати нафту – від 900 до 3100 м, жирний газ з конденсатом – від 2100 до 4000 м і сухий газ – від 2300 до глибше 4000 м.

Список використаних джерел

- Атлас родовищ нафти і газу України. (1998). У 6 т. Ред. М.М. Іванюта, В.О. Федішин, Б.І. Денегі та ін. Львів: УНГА.
- Бенько, В., Лукин, А., Гладун, В. и др. (2005). Богатойско-Орельско-Затышнський мегаатол – крупний ареал нефтегазоаккумуляции на юго-востоке Днепровско-Донецкой впадины. *Геолог України*, 1, 16–17.
- Вертюх, А.М. (2007). Розчленування та попластова кореляція нижньовізейських відкладів, їх розповсюдження та мінливість літологічного складу у південній прибортовій зоні ДДЗ. *Проблеми нафтогазової промисловості*, 5, 29–34.
- Вертюх, А.М. (2018). Геологічна будова та перспективи нафтогазоносності нижнього карбону південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Дис. канд. геол. наук*: 04.00.01. Київ.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геологічний журнал*, 36, 1, 145–157.
- Загнітко, В.М., Михайлов, В.А. (2014). Геохімічні особливості газової складової газонасних сланцевих товщ України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1 (64), 11–17.
- Карпенко, І.О. (2017). Нафтогазова система південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Дис. ... кандидата геол. наук*: 04.00.17 – геологія нафти і газу. Київ.
- Карпенко, І.О. (2018). Нафтогазова система Дніпровсько-Донецької западини. Кн. 1. Південна прибортова зона. Saarbrücken.
- Лукин, А.Е. (2010¹). Сланцевый газ и перспективы его добычи в Украине. Ст. 1. Современное состояние проблемы сланцевого газа (в свете опыта освоения его ресурсов в США). *Геол. журн.*, 3, 17–32.
- Лукин, А.Е. (2010²). Сланцевый газ и перспективы его добычи в Украине. Ст. 2. Черносланцевые комплексы Украины и перспективы их газонасности в Вольно-Подольи и Северо-Западном Причерноморье. *Геол. журн.*, 4, 7–24.
- Лукин, А.Е. (2011). Перспективы сланцевой газонасности Днепровско-Донецкого авлакогена. *Геол. журн.*, 1, 21–41.
- Михайлов, В.А., Огар, В.В., Зейкан, О.Ю. та ін. (2011). Перспективи газонасності сланцевих відкладів східного сектору Дніпровсько-Донецької западини. *Геолог України*, 2, 51–58.
- Михайлов, В.А., Сметько, О.В. (2014). Рівень дозрілості органічної речовини Дніпровсько-Донецької западини у зв'язку з перспективою відкриття родовищ нетрадиційного газу. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1 (64), 48–53.

Михайлов, В., Курило, М., Андреева, О. (2014). Принципи геолого-економічної оцінки нетрадиційних ресурсів вуглеводнів. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 2 (65), 40–44.

Михайлов, В.А., Загнітко, В.Н. (2015). Геолого-геохимические основы оценки газонасности сланцевых толщ Украины. Saarbrücken, Palmarium academic publishing.

Несіна, Н., Здровенко, М., Шкроб, Т., Дяченко, К. (2012). Візейський карбонатний масив на Ливенській структурі (центральна частина південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини). *Геолог України*, 1–2, 83–86.

Нетрадиційні джерела вуглеводнів України (2014¹). Кн. I. Нетрадиційні джерела вуглеводнів: огляд проблеми. К.: Ніка-центр.

Нетрадиційні джерела вуглеводнів України (2014²). Кн. II. Західний нафтогазоносний регіон. К.: Ніка-центр.

Нетрадиційні джерела вуглеводнів України (2014³). Кн. III. Південний нафтогазоносний регіон. К.: ВПЦ Київський університет.

Нетрадиційні джерела вуглеводнів України (2014⁴). Кн. IV. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. К.: ВПЦ "Київський університет".

Нетрадиційні джерела вуглеводнів України (2013⁵). Кн. V. Перспективи освоєння ресурсів сланцевого газу та сланцевої нафти в Східному нафтогазоносному регіоні. К.: ТОВ "ВТС ПРИНТ".

Нетрадиційні джерела вуглеводнів України (2014⁶). Кн. VI. Перспективи освоєння ресурсів газу щільних порід в Східному нафтогазоносному регіоні. К.: ТОВ "ВТС ПРИНТ".

Нетрадиційні джерела вуглеводнів України (2013⁷). Кн. VII. Метан вугільних родовищ, газогідрати, імпакті структури і наклади западини Українського щита. К.: Ніка-центр.

Нетрадиційні джерела вуглеводнів України (2014⁸). Кн. VIII. Теоретичне обґрунтування ресурсів нетрадиційних вуглеводнів осадових басейнів України. К.: Ніка-центр.

Ambrose, W.A., Potter, E.C., Briceno, R. (2009). An "Unconventional" Future for Natural Gas in the United States. *Thursday, February 12*.

EIA Analysis & Projections (2011). World shale gas resources: An initial Assessment of 14 regions outside the United States. *U.S. Energy Information Administration*.

Hadro, J. (2010). Shale gas exploration strategy. *Przegląd Geologiczny*, 58, 250–258.

Integrated Approach for Shale Gas Reservoir Characterization: Stress Analysis and Sweet Spot Discrimination. (2012). *Hampson-Russell Software and Services, CGGVeritas. Geoph. Soc. Houston J.*, 10–14.

Kuuskraa, V., Stevens, S., Van Leeuwen, T., Moodhe, K. (2011). World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States. *Advanced Resources International, Inc. Arlington, VA USA*. Wykonane dla: U. S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585.

Lainda, N. (2012). Introduction To Shale Gas Formation Evaluation. *Formation and Reservoir Solutions. Halliburton*.

U.S. Geological Survey Oil and Gas Assessment Team (2012). Variability of distribution of well-scale estimated ultimate recovery for continuous (unconventional) oil and gas resources in the United States. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2012-1118*.

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

References

- Ambrose, W.A., Potter, E.C., Briceno, R. (2009). An "Unconventional" Future for Natural Gas in the United States. *Thursday, February 12*.
- Atlas of oil and gas of Ukraine. (1998). At 6 books. Ed. Ivanuta, M.M., Fedyshin, V.O., Denega, B.I. et al. Lviv: UNGA.
- Benko, V., Lukin, A., Gladun V. et al. (2005). The Bogatoy-Orel-Zatyshnysky megaatoll – a large area of oil and gas accumulation in the southeast of the Dnieper-Donetsk depression. *Geologist of Ukraine*, 1, 16–17.
- Castillo, G., Sena, A., Chesser, K. et al. (2012). Integrated Approach for Shale Gas Reservoir Characterization: Stress Analysis and Sweet Spot Discrimination. *Hampson-Russell Software and Services, CGGVeritas. Geoph. Soc. Houston J.*, 10–14.
- EIA Analysis & Projections (2011). World shale gas resources: An initial Assessment of 14 regions outside the United States. *U.S. Energy Information Administration*.
- Hadro, J. (2010). Shale gas exploration strategy. *Przegląd Geologiczny*, 58, 250–258.
- Karpenko, I.O. (2017). The oil and gas system of the southern edge zone of the Dnieper-Donetsk depression. *Dis. ... Cand. Geol. Sciences: 04.00.17*. K.
- Karpenko, I.O. (2018). Oil and gas system of the Dnieper-Donetsk depression. Book 1. Southern edge area. Saarbrücken.
- Kuuskraa, V., Stevens, S., Van Leeuwen, T., Moodhe, K. (2011). World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States. *Advanced Resources International, Inc. Arlington, VA USA*. Wykonane dla: U. S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585.
- Lainda, N. (2012). Introduction To Shale Gas Formation Evaluation. *Formation and Reservoir Solutions. Halliburton*.
- Lukin, A.E. (2010¹). Shale gas and prospects for its production in Ukraine. Art. 1. The current state of the shale gas problem (in the light of the experience of developing its resources in the USA). *Geol. journal*, 3, 17–32.

Lukin, A.E. (2010²). Shale gas and prospects for its production in Ukraine. Art. 2. Black shale complexes of Ukraine and the prospects of their gas content in Volyn-Podolia and the Northwest Black Sea. *Geol. journal*, 4, 7–24.

Lukin, A.E. (2011). Prospects for shale gas content of the Dnieper-Donetsk aulacogen. *Geol. journal*, 1, 21–41.

Mykhailov, V., Kurilo M., Andreeva O. (2014). Principles of geological and economic evaluation of unconventional hydrocarbon resources. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (65), 40–44.

Mykhailov, V.A., Emets O.V. (2014). Maturity level of organic matter of the Dnieper-Donetsk basin due to the prospect of unconventional gas deposits openin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (64), 48–53.

Mykhailov, V.A., Ogar V.V., Zeykan O.Yu. et al. (2011). Prospects for gas-bearing shale deposits of eastern part of Dnieper-Donetsk depression. *Geologist of Ukraine*, 2, 51–58.

Mykhailov, V.A., Zagnitko V.N. (2015). Geological and geochemical basics for evaluation of gas-bearing shale strata of Ukraine. Saarbrücken, Germany: Palmarium academic publishing.

Nesina, N., Zdorovenko M., Shkrob T., Dyachenko K. (2012). Viseysky carbonate massif on the Leven structure (the central part of the southern edge zone of the Dnieper-Donetsk depression). *Geologist of Ukraine*, 1–2, 83–86.

U.S. Geological Survey (2012). Oil and Gas Assessment Team. Variability of distribution of well-scale estimated ultimate recovery for continuous (unconventional) oil and gas resources in the United States. U.S. Geological Survey Open-File Report 2012-1118.

Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine (2013⁵). Book 5. Development potential of shale gas and shale oil resources in Eastern oil-gas-bearing region of Ukraine. Kyiv: "Print".

Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine (2013⁷). Book 7. Coalbed methane, gas hydrates, impact structures and superimposed depressions of the Ukrainian Shield. Kyiv: Nika-centre.

Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine (2014¹). Book 1. Unconventional source of hydrocarbons: problem review. Kyiv: Nika-centre.

Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine (2014²). Book 2. Western gas-bearing region. Kyiv: Nika-centre.

Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine (2014³). Book 3. South oil-gas-bearing region. Kyiv: Kiev University.

Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine (2014⁴). Book 4. Eastern oil-gas-bearing region. Analytical investigations. Kyiv: Kiev University.

Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine (2014⁶). Book 6. Development potential of tight gas resources in the East Ukraine petroleum province. Kyiv: "VTS Print".

Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine (2014⁸). Book 8. Theoretical substantiation of unconventional hydrocarbon resources in sedimentary basins of Ukraine. Kyiv: Nika-centre.

Vertyukh, A.M. (2007). Stratification and layer correlation of Lower V deposits, their distribution and variability of lithological composition in the southern instrument area DDD. *Problems of oil and gas industry*, 5, 29–34.

Vertyukh, A.M. (2018). Geological structure and prospects of oil and gas content of the Lower Carboniferous zone of the southern instrument zone of the Dnieper-Donetsk depression. *Dis. ... Cand. Geol. Sciences: 04.00.01*. K.

Vizhva, S.A., Mykhailov V.A., Onishchuk D.I., Onishchuk I.I. (2014). Petrophysical parameters of rocks promising for shale gas (sites of the eastern sector of the Dnieper-Donetsk depression). *Geophysical journal*, 36, 1, 145–157.

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

Zagnitko, V.M., Mykhailov, V.A. (2014). Geochemical features of the gas component gas-bearing shale strata of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (64), 11–17.

Надійшла до редколегії 01.10.19

V. Mykhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vladvam@gmail.com;
O. Karpenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: karpenko.geol@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

PROSPECTS OF UNCONVENTIONAL OIL AND GAS POTENTIAL OF THE SOUTHERN ZONE OF DNEPER-DONETSK DEPRESSION

Based on the analysis of numerous works and publications, the studying of core samples, the interpretation of well-logging data, the studying of geochemical features and the degree of thermal processing of oil and gas strata, the prospects for unconventional oil and gas potential of geological structures and formations of the Zachepiliv-Liventsivsk shaft of the southern zone of the Dnieper-Donetsk Depression (DDD) are determined, which corresponds to the Rudenivsko-Proletarsky oil and gas region. Based on the studies, it is proved that the thermal maturity of the rocks of the southern zone within the Zachepiliv-Liventsivsk shaft is extremely uneven both in area and in section and only in certain areas (Bagatoyaska-25, Kernosivska-2 wells), or at depths greater than 1500 m (well Zachepilivska-100) or even 2700 m (well Ulyanivska-18), reaches favorable values sufficient for gas generation. Therefore, despite the rather high content of TOC, which, as a rule, significantly exceeds 1–2 %, the prospects of this section of the southern zone of the DDD with respect to the discovery of shale gas or gas of tight rocks are very problematic. According to the set of indicators characterizing potentially gas-containing shale rocks, the most promising section of this part of the southern zone is the well area. Bagatoyaska-25 and Kernosivska-2. Predicted shale gas resources of this section can be preliminary estimated at 40–50 billion m³. This should be taken into account when planning further exploration for shale gas. From the data analysis, one can distinguish depth intervals at which rocks enriched with organic matter can generate oil – from 900 to 3100 m, fatty gas with condensate – from 2100 to 4000 m and dry gas – from 2300 to deeper than 4000 m.

Keywords: shale gas, tight reservoir, oil and gas basin, resources, well logging.

B. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vladvam@gmail.com;
А. Карпенко, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: karpenko.geol@gmail.com;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕТРАДИЦИОННОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЮЖНОЙ ПРИБОРТОВОЙ ЗОНЫ ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ

На основе анализа многочисленных работ и публикаций, изучения керна скважин, переинтерпретации данных геофизических исследований скважин, исследования геохимических особенностей и степени термальной переработки нефтегазовых толщ определены перспективы нетрадиционной нефтегазоносности геологических структур Зачепиловско-Ливенцовского вала южной прибортовой зоны Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ), которая соответствует Руденковско-Пролетарскому нефтегазоносному району. На основе проведенных исследований доказано, что термальная зрелость пород южной прибортовой зоны в пределах Зачепиловско-Ливенцовского вала является крайне неравномерной как по площади, так и в разрезе, и только на отдельных участках (скважины Багатойская-25, Кернососовская-2) или на глубинах более 1500 м (скважина Зачепиловская-100), или даже 2700 м (скважина Ульяновская-18), достигает благоприятных величин, достаточных для газобразования. Поэтому, несмотря на достаточно высокое содержание S_{org} , которое, как правило, значительно превышает 1–2 %, перспективность этого участка южной прибортовой зоны ДДВ в отношении открытия залежей сланцевого газа или газа уплотненных пород весьма проблематична. Наиболее перспективным участком этой части прибортовой зоны по комплексу показателей, характеризующих потенциально газосодержащие сланцевые породы, является район скв. Багатойская-25 и Кернососовская-2. Прогнозные ресурсы сланцевого газа этого участка могут быть предварительно оценены в 40–50 млрд м³. Это надо учитывать при планировании дальнейших геологоразведочных работ на сланцевый газ. Из анализа данных можно выделить интервалы глубин, на которых обогащенные органикой породы способны генерировать нефть – от 900 до 3100 м, жирный газ с конденсатом – от 2100 до 4000 м и сухой газ – от 2300 до глубже 4000 м.

Ключевые слова: сланцевый газ, уплотненный коллектор, нефтегазоносный бассейн, ресурсы, геофизические исследования скважин.

УДК 553.07

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.09>

Б. Дьячков, д-р геол.-минералог. наук, акад. НАН РК, проф.,
E-mail: bdyachkov@mail.ru;
М. Мизерная, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: mizernaya58@bk.ru;
С. Айтбаева, докторант,
E-mail: AitbayevaSS@mail.ru;
А. Мирошникова, PhD,
E-mail: Anastasiya-2588@mail.ru;
О. Кузьмина, PhD, ст. препод.,
E-mail: kik_kuzmins@mail.ru;
Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
ул. Серикбаева, 19, г. Усть-Каменогорск, 070004, Казахстан

ОНГОНИТОВЫЕ ДАЙКИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА И СПЕЦИФИКА ИХ РУДОНОСНОСТИ

(Представлено членом редакционной коллегии д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Рассматривается геотектоническая позиция, возраст, особенности вещественного состава и рудоносности позднепалеозойских дайковых поясов Восточного Казахстана. Более ранняя группа даек и гипабиссальных малых интрузий габбро-диорит-гранодиорит-плагиогранитовой серии, сформированная в коллизионной геодинамической обстановке (C_{2-3} - C_3) на сочленении Казахстанского и Сибирского микроконтинентов, образует протяженные интрузивно-дайковые пояса северо-западного направления и является продуктивной на магматическое медно-никелевое, медно-порфировое и золотое оруденение. Вторая группа даек габбродиорит-гранитпорфировой серии (P_2) послеплатового типа образовалась в постколлизионных геодинамических условиях на завершающей стадии герцинского тектоно-магматического цикла, фиксируется северо-восточными поясами, в составе которых только поздняя генерация даек кварцевых порфиров и кварцевых альбитофиров относится к онгонитоподобным образованиям.

Приводится характеристика онгонитоподобных топазаносных даек Калба-Нарымской зоны и Иртышской зоны смятия, подчеркивается происхождение их из остаточных глубинных магматических очагов и геохимическая специализация на редкие металлы (Ta, Nb, Li, Sn, W и др.). Онгонитовые дайки имеют обычно свежий облик, выдержанный петрографический состав и не содержат оруденения практической значимости. Пространственная приуроченность их к гранитным массивам, широкое развитие на рудных полях и обогащенность рудоносными флюидами и редкими щелочами, позволяют рассматривать онгониты в качестве благоприятного поискового критерия для прогнозирования скрытых редкометаллических месторождений.

Ключевые слова: дайки, онгониты, возраст, состав, редкие металлы, прогнозирование, Восточный Казахстан, Большой Алтай.

Введение. Территория Восточного Казахстана объединяет герцинские геологические структуры Большого Алтая (Рудный Алтай, Калба-Нарымская зона, Западная Калба и Жарма-Саур), ограниченные каледонидами Горного Алтая (на северо-востоке) и Чингиз-Тарбагатая (на юго-западе). Небольшую площадь занимают структуры Северного Прибалхашья. Рассматриваемый геологический полигон, входящий в общую систему Центрально-Азиатского пояса, объединяет многие крупные и уникальные месторождения меди, свинца, цинка, золота, серебра, известные также редкометаллические и редкоземельные объекты и другие полезные ископаемые, на базе которых работают предприятия горнометаллургического комплекса.

В настоящее время в Восточном Казахстане остро стоит проблема восполнения минерально-сырьевой базы цветных, благородных и редких металлов. Особенно актуален вопрос возрождения прогнозно-поисковых и геологоразведочных работ на редкие металлы (Ta, Be, Li, Sn и др.) в связи с отработкой и консервацией в конце 90-х годов известных редкометаллическо-пегматитовых месторождений Бакенное, Юбилейное, Белая Гора и др.

Важнейшей задачей является разработка региональных и локальных критериев глубинного геологического прогноза скрытых редкометаллических месторождений в качестве научной основы постановки дальнейших геологоразведочных работ. В этой связи остаются недостаточно изученными вопросы геотектонической позиции, масштабы развития, вещественного состава и рудоносности онгонитовых даек, проявленных в различных районах Восточного Казахстана. Целью исследования являлось уточнение геологической позиции разновозрастных дайковых поясов на основе современных геотектонических концепций, дополнительное изучение

вещественного состава онгонитовых даек с использованием методов электронной микроскопии и оценка специфики их редкометаллической рудоносности, имеющие научное и прикладное значение.

Методология исследований заключалась в критическом анализе материалов геолого-съемочных работ масштаба 1:50 000 прошлых лет с использованием современных космоснимков и литературных источников разных лет, проведении полевых экспедиционных работ на основных редкометаллических рудных полях Калбы и Иртышской зоны, изучении вещественного состава онгонитовых даек в лаборатории IRGETAS ВКГТУ методами масс-спектрометрии (ICP MS Agilent 7500 cx), электронной микроскопии (JSM-6390 LV). Выполнялись петрографические и петрохимические исследования.

Было установлено, что главные типы месторождений редких металлов в регионе сформировались в постколлизионной (орогенной) внутримитной геодинамической обстановке, сопровождавшейся мощным развитием гранитоидного магматизма пермского времени, характерного для многих районов Центральной Азии. (Владимиров и др., 2008; Дергачев, 1989; Куйбыда и др., 2009; Mizernaya et al., 2017). Пространственно они размещаются в гранитоидных поясах северо-западного простирания, контролируются системой глубинных разломов и локализованы преимущественно в тектонически ослабленных зонах с сиалическим типом разреза земной коры (Владимиров и др., 2008; Han et al., 2014; Khromykh et al., 2016; Щерба и др., 2000).

Калба-Нарымский гранитоидный пояс является ведущей редкометаллической структурой Большого Алтая, в которой сосредоточены многие месторождения и рудопроявления редкометаллических пегматитов (Ta, Nb, Be, Li, Cs, Sn), альбитит-грейзеновые (Sn, Ta, Li),

грейзеново-кварцевожилые и гидротермальные кварцевожилые (Sn, W), а также россыпи танталита, касситерита, вольфрамит, шеелита и монацита, в основном отработанные (всего порядка 405 объектов) (*Куйбида и др., 2009*). Определена пространственно-генетическая связь главного редкометаллического оруденения (Ta, Nb, Be др.) с главной фазой Калбинского комплекса, сопоставляемого с пегматитоносной гранитовой системой гранитоидов нормальной щелочности (*Бескин и Марин, 2017*). Установлена разновозрастность дайковых пород, ранние из которых в прежних схемах магматизма рассматривались как добатолитовые образования (кунушский комплекс (C₃)), а поздние относились к постбатолитовым дайкам II этапа (посткалбинский комплекс) (по Д.С. Коржинскому).

Посткалбинский дайковый комплекс, широко проявленный в Миролубовском гранитном массиве, впервые детально охарактеризован в работе К.Г. Богдановой (*Богданова, 1960*). Комплекс представлен дайками габбро-диабазов, диапировых порфиров, кварцевых порфиров сложного состава, сформированных в заключительный этап герцинского тектоно-магматического цикла. Среди них в возрастном отношении выделяются три последовательные группы даек основного (5 %), среднего (70 %) и кислого (25 %) составов. Простирание даек СВ 30–75°, углы падения крупные (75–85°), мощность их достигает 1,5–6 м, а длина составляет сотни метров – первые километры. Дайки кварцевых порфиров содержат вкрапленники кварца и кварцевого полевого шпата и характеризуются фельзитовой, псевдоферолитовой и пойкилитовой структурами базиса. В прошлые годы в посткалбинском комплексе онгониты не выделялись. В дальнейшем более поздняя группа порфировых даек выделена в габбродиабаз-гранитопорфировую формацию (миролюбровский комплекс P₂) (*Куйбида и др., 2009; Щерба и др., 2000*).

Впервые литий-фтористые гранит-порфиры, предполагаемые аналогами онгонитов, были описаны (*Лушко и др., 1978*) в Чечекском дайковом поясе Иртышской зоны смятия. По их данным, это породы светло-серой окраски с порфировыми вкрапленниками кварца, альбита и калиевого полевого шпата. Основная масса имеет микрозернистую, микроаллотриоморфнозернистую структуру. Соотношение минералов (%): альбит (40–50), калиевый полевой шпат (до 15–20), кварц (до 25), литиеносные слюды (10–15). Альбит (№2-5) представлен вкрапленниками неправильной формы, корродируется основной массой. Калиевый полевой шпат встречается в виде вкрапленников изометричной формы, содержит мелкие включения альбита и слюды. Кварц образует вкрапленники, нередко ограненной формы, и содержится в виде мелких зерен в основной массе. Слюды представлены бесцветными чешуйками, содержащими включения альбита, калишпата и апатита. По составу соответствуют литиевым мусковитам. Акцессорные минералы: флюорит, топаз, гранат, ильменит, касситерит, турмалин и др. По петрохимическим данным в них присутствуют Na₂O (5 %), K₂O (3,62 %), F (1,31 %). По геохимическим данным породы обогащены (г/т): Li (1196), Rb (1228), Sn (150), Nb (60), Ta (20) и по этим признакам сопоставляются с онгонитами по В.И. Коваленко (1977) и другим авторам (*Антипин и др., 2009; Поцелуев и др., 2008; Соколова и др., 2016*). Как известно, к онгонитам относятся породы с содержанием Na₂O > K₂O. Более детальное изучение онгонитов Восточного Казахстана выполнили С.В. Хромых и Е.Н. Соколова на примере Чечекского и Ахмировского дайковых поясов (*Соколова и др., 2016; Хромых и др., 2018*).

Результаты исследований. Нашими исследованиями уточнена геотектоническая позиция и рудоносность дайковых поясов в общей структуре Большого Алтая.

В Калба-Нарымской зоне выделяются две возрастные группы дайковых пород: 1) добатолитовая коллизионного типа (C₂₋₃-C₃) и 2) послебатолитовая постколлизионная (P₂). Первая группа представлена дайками габбродиабаз-диорит-гранодиорит-плагิโอгранитовой серии (C₂₋₃-C₃) коллизионного типа, образующими прерывистые региональные пояса северо-западного направления (кунушский комплекс и его аналоги). Их возрастная позиция определяется тем, что они прорывают отложения буконской (C₂) и майтубинской (C₂₋₃) свит, а сами срезаются и метаморфизуются гранитными интрузиями калбинского комплекса (P₁). Позднекаменноугольный возраст даек подтверждается новыми радиогеохронологическими данными (*Куйбида и др., 2009*). В пространственно-генетической связи с ними ассоциируют промышленные золоторудные месторождения (*Dyackov et al., 2017; Mizernaya et al., 2017; Mizerny et al., 2017*). Вторая группа габбродиабаз-гранитпорфировых даек сформировалась в постколлизионной (орогенной) геодинамической обстановке, контролируется северо-восточными разломами, пересекает гранитные массивы калбинского (P₁) и монастырского (P₂) комплексов.

Наибольшая концентрация даек отмечается в пределах гранитных массивов, в сланцевой толще их количество сокращается, отдельные дайки проникают в Иртышскую зону смятия. Подчеркивается гомодромная последовательность формирования дайковой серии с образованием на заключительной стадии онгонитов и онгонитоподобных даек. Авторами статьи проводилось их изучение в Шульбинском рудном районе и на других участках.

Шульбинский рудный район расположен на северо-западном фланге Калба-Нарымского редкометаллического пояса, вблизи российской территории (лист М-44-IX). Границей района на северо-востоке является Иртышская зона смятия, на юго-западе по системе Теректинского глубинного разлома он отделяется от золоторудного пояса Западной Калбы и в основном перекрыт чехлом рыхлых отложений (рис. 1).

По материалам геолого-геофизических работ прошлых лет в Шульбинском районе выделяются скрытые гранитоидные массивы, отдельные апофизы которых выходят на дневную поверхность (рис. 1). Мощность массивов достигает более 4 км, поверхность их неровная с локальными гребневидными выступами. В грейзенизированных гранитах и сланцах надинтрузивной зоны сформировались грейзеновые и кварцевожилые рудопроявления, представленные в основном многочисленными кварцевыми жилами и прожилками с вольфрамитовой и касситеритовой минерализацией (Коростели, Кожанкуль, Степановское, Ржавая Сопка и др.).

Рудопроявление Ржавая Сопка представлено крупной дайкой кварцевых порфиров с касситерит-сульфидной минерализацией, фиксируемой в виде гребневидного выхода (рис. 2, д). Выявлено работами П.И. Полторыхина и др. (1957–1959 гг.), в дальнейшем его изучали В.Н. Каймаков, В.Ф. Кашеев, А.М. Башкирцев, А.Е. Степанов и др. Дайка вытянута в северо-западном направлении на 800 м при мощности до 10–20 м, углы падения 75–80° на северо-восток. По А.Е. Степанову на этом участке выделяется еще 8 аналогичных даек длиной 80–100 м, мощностью 6–20 м без видимой рудной минерализации.

Нами при ревизионных работах вблизи сопки наблюдались небольшие выходы лейкократовых гранитов с вкрапленностью флюорита и повышенными содержаниями в

штуфных пробах W, Sn, Bi, Cu, Pb, Zn. По петрографическому составу кварцевые порфиры характеризуются высоким содержанием кварца, топаза и повышенной оловоносностью. Главный рудный минерал – касситерит тонкозернистой модификации, сопутствующие – кварц, мусковит и др. Отмечается также вкрапленность циркона, монацита и уранита. В измененных зонах широко

проявлены гидроокислы железа и марганца. По результатам масс-спектрометрии кварцевые порфиры светлой окраски отмечаются калиево-натриевой щелочностью ($Na/K=1,8$), повышенным содержанием Ca (2,75 мас. %), P (0,37 мас. %) и низкими значениями Fe, Mg. Среди редких элементов выявлены аномальные содержания Li, Rb, Sn, а также весовые значения Ta, Nb (табл. 1). Сумма редких земель невысокая (21,83 г/т).

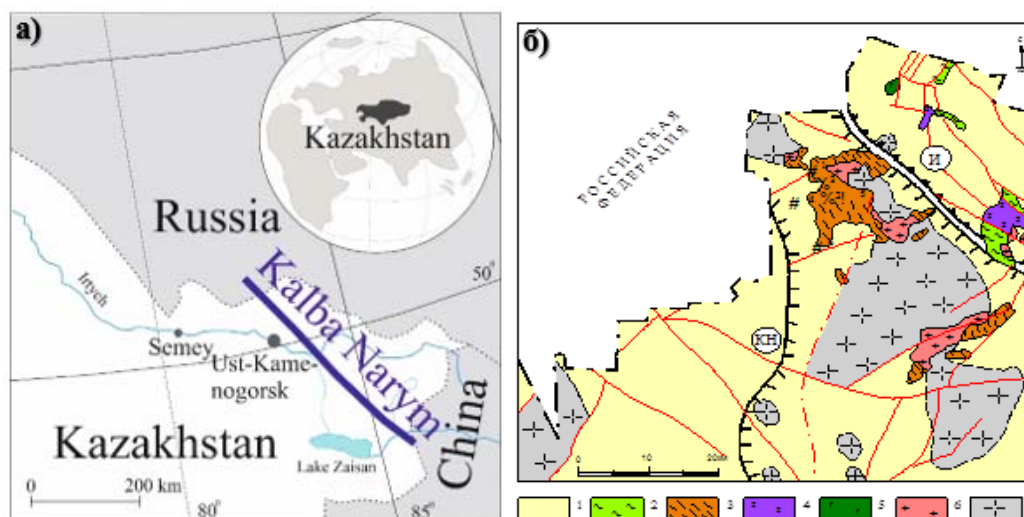


Рис. 1. Геологическое строение Шульбинского района Калба-Нарымского рудного пояса:

а – обзорная схема; б – 1 – кайнозойские рыхлые отложения: суглинки, супеси, пески, глины, алевриты, гравий (KZ); 2 – зеленые метаморфические сланцы, песчаники, алевриты (D₂); 3 – черные сланцы, песчаники, алевриты такырской свиты (D₃); 4 – ультрабазиты (PR?); 5 – габбро-диабазы, габбро-диориты, диабазы (C₁); 6 – гранитоиды калбинского комплекса (P₁); 7 – скрытые массивы гранитоидов. Металлогенические зоны: И – Иртышская, КН – Калба-Нарымская. Рудные объекты: 1 – Степановский, 2 – Комаровский, 3 – Ближний, 4 – Коростелевский, 5 – Ржавая Сопка, 6 – Кожанкуль

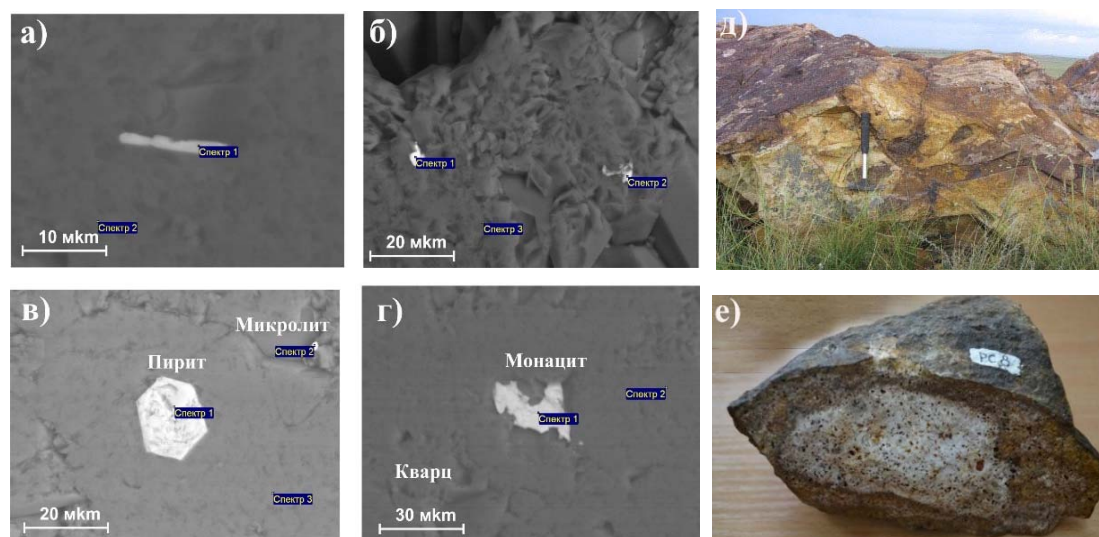


Рис. 2. Рудопроявление Ржавая сопка, дайка кварцевого порфира:

включения танталит-колумбита: а – веретенообразной и б – амёбовидной формы в кварце; в – идиоморфное зерно пирита и вкрапленность микролита; г – монацит с изрезанными границами в кварце; д – эруптивные брекчи в гребневидном выступе дайки кварцевого порфира; е – оторочка бурых железняков в образце кварцевого порфира, микровключения минералов в кварцевых порфирах светлой окраски

Таблица 1

Содержание редких элементов в кварцевых порфирах рудопроявления Ржавая Сопка (г/т).

Результаты анализов ICP-MS. Аналитик С.Н. Полежаев

Проба	Ta	Nb	Be	Li	Rb	Cs	Sn	W	Mo
РС-3	2,11	21,39	1,14	318,6	164,2	4,88	12,07	0,65	0,88
РС-4	0,76	10,47	0,91	27,57	12,40	0,31	46,20	2,83	3,13
РС-6	0,28	4,85	1,11	19,52	8,80	0,24	46,22	0,70	1,67
РС-9	1,72	18,62	1,09	33,20	36,45	0,39	33,68	0,71	1,46
Среднее	1,22	13,83	1,06	99,72	55,46	1,46	35,04	1,22	1,79

На растровом электронном микроскопе в них зафиксированы микровключения танталит-колумбита (с примесью W до 3,35–11,66 %), микролита, пирита и монацита (рис. 2, а-г).

Рудоносными являются брекчированные кварцевые порфиры с образованием эруптивных брекчий, оловоносных топазовых грейзенов или онгонитов (Дергачев, 1989). Брекчии сложены угловатыми обломками измененных плагиогранитов, габброидов, диабазов и других пород размером от первых сантиметров до 1–1,5 м (рис. 2, д). В зоне окисления они представлены бурыми железняками ржаво-бурой окраски, постепенно сменяющимися более светлыми разностями кварцевых порфиров (рис. 2, е).

В брекчированных и лимонитизированных кварцевых порфирах (буровато-красной окраски) существенно увеличены содержания Fe, V, Cr, Sr, а также (в г/т) Cu (до 160), Zn (до 260), As (до 499,5) и Bi (40). В бурых железняках значительно повышены концентрации редких земель легкой группы (общая сумма 134,45 г/т), в меньшей степени увеличены значения Li, Rb, W, Mo. Характерны весовые значения In (до 2,95–11 г/т), вероятно типичной примеси касситерита (по аналогии с оловорудным месторождением Чердож в Нарыме). На РЭМ-изображении часто встречается вкрапленность касситерита неправильной формы (размером до 300 мкм), ассоциирующего с гетитом, кварцем и топазом (рис. 3).

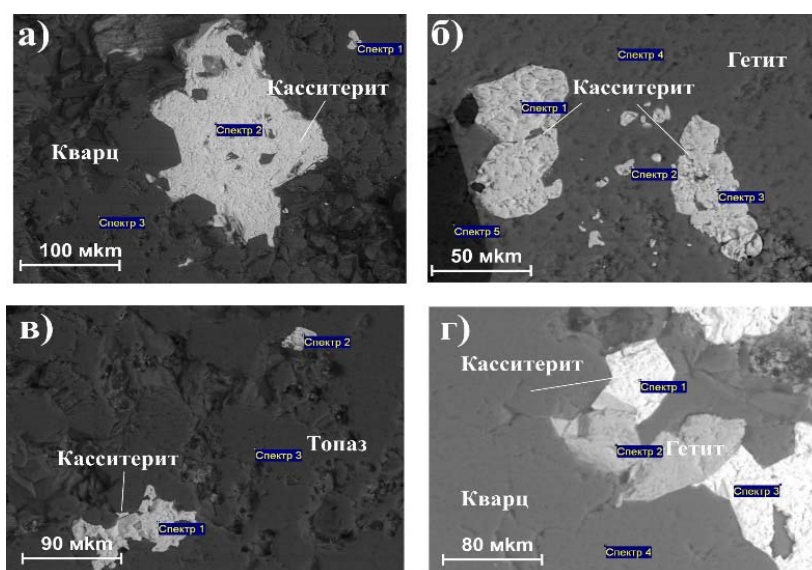


Рис. 3. Микровключения минералов в окисленной дайке кварцевых порфиров рудопроявления Ржавая сопка.

Аналитик С. Садиев: а – микрозернокасситерита в кварце; б – вкрапленность касситерита в гетите; в – вкрапленность касситерита в топазе; г – сростки касситерита и гетита в кварце

По результатам поисковых работ (с проходкой канав и буровых скважин) содержание Sn в дайке изменяется от 0,01 до 0,6 %, а во вмещающих породах достигает 0,3 %. Прогнозные ресурсы олова на отдельных участках дайки составляют 14 400 т (Степанов и др., 2006). Проведенные исследования показывают, что на рудопроявлении Ржавая Сопка рудоносными являются брекчированные и гидротермальноизмененные кварцевые порфиры онгонитоподобного типа с касситерит-сульфидной минерализацией. Определена геохимическая специализация этих пород на Sn, F, в меньшей степени на Li, Rb. По типу оруденения рассматриваемый объект сопоставляется с месторождением Юбилейный Октябрь, расположенном в экзоконтакте Дельбегетейского массива (Западная Калба). По масштабности он пока не имеет практического значения, но учитывая его благоприятную позицию над куполами гранитных массивов, является индикатором скрытого редкометаллического оруденения и поэтому заслуживает дополнительного изучения.

Миролюбовский дайковый комплекс сформировался на заключительной стадии герцинского тектоно-магматического цикла, в постколлизийной геодинамической обстановке. Представлен протяженными дайковыми поясами северо-восточного направления, пересекающими все более ранние интрузивные образования Калба-Нарымской зоны. Эталонным является Миролюбовский дайковый пояс Восточной Калбы (рис. 4), который изучался К.Г. Богдановой и другими исследователями (Хомичев, 2010).

Рассматриваемый пояс пересекает граниты Миролюбовского и Подгорненского массивов, вольфрамитовые кварцевые жилы месторождения Большевик (рис. 4, б1) и шеелитоносные грейзены (Палатцы) (рис. 4, б2) и далее проникает в Иртышскую зону смятия без видимого изменения.

По радиогеохронологическим данным изотопного U/Pb метода возраст даек соответствует поздней перми (P₂) – 267–279 млн лет (Хромых и др., 2018). Комплекс объединяет три пространственно сближенных группы даек основного, среднего и кислого состава, а также сложные образования (дайка в дайке). По генезису это особая группа пород, предполагается их связь с разноуровневыми остаточными дифференцированными очагами базальтоидного магматизма в нижних частях ЗК (Соколова и др., 2016). К онгонитоподобным относятся только поздние дайки кварцевых порфиров и кварцевых альбитофиров, геохимически специализированные на редкие элементы (Ta, Nb, Be, Li, Sn).

В Миролюбовском поясе такие дайки характеризуются повышенной кремнекислотностью (Q=+28,2) и калиево-натриевой щелочностью (K₂O+Na₂O=8,68 %, отношение Na/K=1,5), высокой плюмазитовой агаитностью (Ka=0,86) и низким содержанием железо-магнелиальных компонентов. Геохимически они обогащены редкими щелочами (Σ Li+Rb+Cs=1864,6 г/т), редкими элементами (Ta-62,14; Nb-137; Be-30,48; Sn-39,06 г/т). Отмечаются повышенные значения Ga – 31,32; Ag – 4,78; Sb – 3,59 г/т и F – 0,25 мас. %.

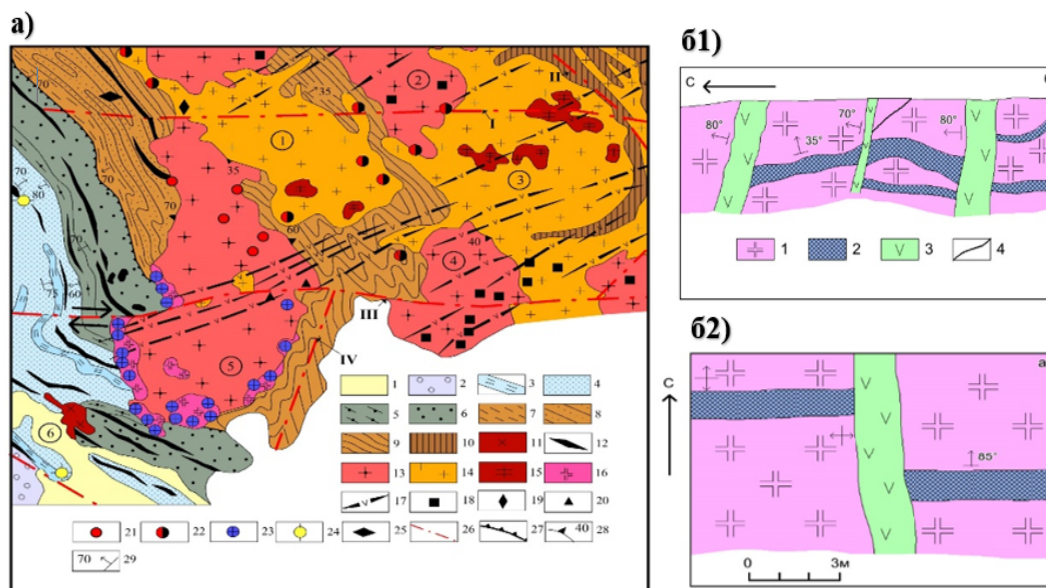


Рис. 4. Мировлюбовский дайковый комплекс:

а – схема геологического строения Восточной Калбы. *Осадочные формации*: 1 – серноцветная разнообломочная (Q); 2 – молассовая (таубинская свита C_2); 3–4 – граувакковая (3 – алевролитовая и 4 – песчаниковая пачки даланкаринской свиты C_1s); 5 – 6 – флишoidная (5 – алевролитовая и 6 – туфопесчаниковая пачки бурабайской свиты C_1V_{2-3}); 7–9 – аспидная (7 – песчано-алевролитовая, 8 – алевролит-песчаниковая и 9 – алевролитовая пачки такырской свиты D_3); 10 – углеродисто-известковисто-терригенная, кыстав-курчумская свита D_2). *Интрузивные формации*: 11–12 – гранодиорит-плаггиогранитовая (11 – гранодиориты и 12 – порфиоровые дайки кунушского комплекса C_3); 13–15 – гранитовая (13 – гранитоиды I фазы, 14 – среднезернистые биотитовые, мусковитизированные граниты и 15 – мелкозернистые граниты II фазы калбинского комплекса P_1); 16 – лейкогранитовая (монастырский комплекс P_2); 17 – габбродиабаз-гранитпорфировая (миролюбовский комплекс P_2). *Рудные формации*: 18 – блоковых микроклиновых пегматитов (Nb, Be); 19 – альбитит-грейзеновая олово-вольфрамовая; 20 – грейзеново-кварцевожилная вольфрамовая; 21 – кварцево-жилная оловянная; 22 – олово-вольфрамовая и 23 – вольфрамовая; 24 – золото-кварцевая; 25 – грейзеново-кварцевожилная олово-вольфрамовая (наложенная на дайки кунушского комплекса); 26 – разломы (I – Центральный, II – Буринский, III – Мировлюбовский, IV – Мамайский, V – Теректинский); 27 – стратиграфическое несогласие; 28 – элементы залегания контактовой поверхности гранитов и 29 – осадочных пород. *Название массивов*: 1 – Комсомольский, 2 – Лайбулакский, 3 – Подгорненский, 4 – Песчанский, 5 – Мировлюбовский, 6 – Раздольненский. б1 – положение даек Мировлюбовского комплекса и гранитоидов; б2 – кварцевые жилы месторождения Большевик и шеелитоносные грейзены (Палатцы)

Вычисленные индикаторные отношения элементов отражают существенное преобладание в дайках натрия и калия над редкощелочными элементами ($Na/Li - 54,6$; $K/Li - 31,1$) при близких значениях $Rb/Li (1,2)$ и невысоком содержании Cs (36,90). Среди редких элементов ниобия незначительно больше тантала ($Nb/Ta - 2,2$) при соотношении $Ta/Sn - 1,6$. В целом подчеркивается геохимическая специализация кварцевых порфиров на редкие металлы и редкие щелочи. Однако потенциальная их рудоносность не реализовалась в виде рудных объектов, что, вероятно, объясняется кристаллохимическим рассеянием редких элементов, слабой проявленностью в них метасоматических процессов и низким энергетическим потенциалом маломощных тел. Учитывая закономерную тенденцию их приуроченности к рудным полям, можно считать онгониты индикаторами скрытого редкометаллического оруденения.

Ахмировский участок расположен на сочленении Калба-Нарымской зоны и Иртышской зоны смятия, вблизи г. Усть-Каменогорска. Главная особенность заключается в том, что в этом районе выделяется нетрадиционный внепегматитовый тип редкометаллического оруденения (Sn, Ta, Li и др.), представленный альбитизированными и грейзенизированными гранитами Ново-Ахмировского проявления. Последнее по генезису и типу оруденения сопоставляется с месторождениями Карасу, Алаха и другими объектами (Анникова и др., 2016). По данным геолого-геофизических работ и буровых скважин (по материалам В.И. Маслова и А.Н. Егорова, 2014 г.) редкометаллические граниты прослеживаются на глубину более 300 м, образуя

штокообразное тело, которое заслуживает дополнительной оценки. Особое значение имеет изучение даек кварцевых альбитофиров (онгонитов), локализованных в габброидах прииртышского комплекса (C_1) на рудопроявлении Караузок.

Рудопроявление Караузок представлено крупным дайкообразным телом габброидов северо-западного направления (мощностью 250–320 м), в северо-восточном эндоконтакте которого развиты поперечные кварцевые прожилки с альбит-флюорит-касситеритовой минерализацией (рис. 5). Рудоносные кварцевые прожилки сближены между собой и образуют штокерк размером в плане 700х280 м, разрабатывались древними рудниками.

Кварцевые прожилки характеризуются сложным составом и неравномерным распределением оруденения. Отмечается обогащенность их альбитом и клеветландитом. Главные рудные минералы – касситерит, берилл и вольфрамит, сопутствующие – кварц, альбит, клеветландит, мусковит, флюорит, топаз и другие. В рудных кварцевых прожилках содержание Sn изменяется от 0,17 до 0,89 %, иногда 2,4 %, повышена концентрация F (0,43–11,34 %). По масс-спектрометрии брекчированные кварцевые прожилки с касситеритом обогащены редкими щелочами (г/т): Li (960), Rb (637), Cs (544,7) и редкими элементами – Be (606), Nb (40,35), Sn (до 504), W (88,54). В составе петрогенных компонентов натрия резко преобладает над калием (в 3–5 раз). В кварц-флюорит-альбитовых метасоматитах отмечаются аномальные значения (г/т): Li (1451), Rb (1275), в меньшей степени Cs (283,9), Sn (49,69) и Nb (27,03). В чистых альбититах несколько повышено содержание Be (до 72,10 г/т).

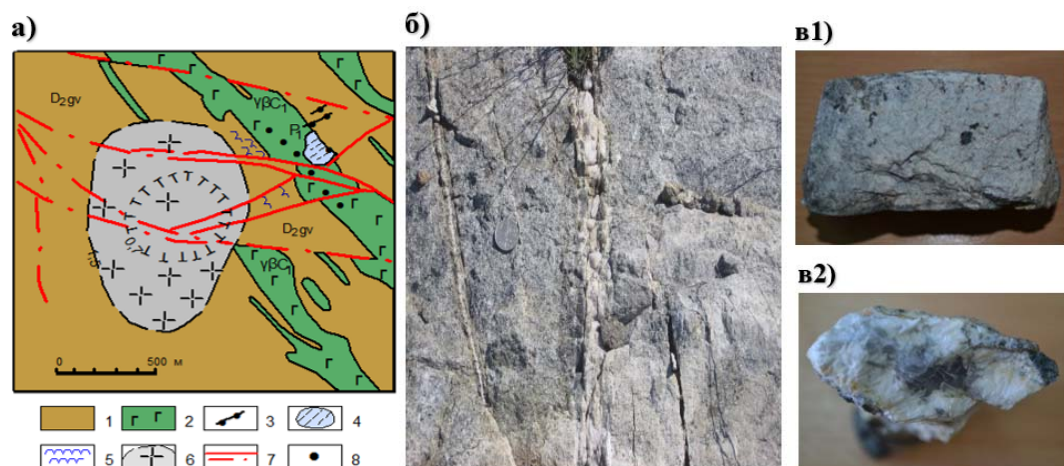


Рис. 5. Геологическое строение и минерализация участка Караузек:

а – схема геологического строения участка Караузек: 1 – ороговикованные карбонатно-терригенные породы кыстав-курчумской свиты (D₂gv); 2 – габбро-диабазы прииртышского комплекса (C1); 3 – дайка кварцевого альбитофира (онгонита); 4 – участок развития кварц-касситеритовых рудных прожилков; 5 – кварцевые жилы; 6 – контуры скрытого гранитного массива, цифры – глубина залегания, км; 7 – разломы установленные и предполагаемые; 8 – буровые скважины. По материалам В.И. Маслова, А.Н. Егорова, 2014; б – кварц-касситеритовый прожилок в габбро; в – типоморфные минералы в рудах рудопроявления Караузек: 1 – вкрапленность коричневого касситерита в кварц-альбитовом прожилке; 2 – флюорит светло-сиреневой окраски в ассоциации с клевеландитом, лепидолитом и топазом

На данном рудопроявлении фиксируется также прерывистый пояс северо-восточных даек кварцевых альбитофиров (онгонитов), рассекающий габброидные тела. Это маломощные плитообразные дайки топазовых альбититов, прослеженные по данным бурения по падению на сотни метров. Макроскопически они представляют собой породы белого цвета фельзитовидного облика, сложенные преимущественно альбитом. Характеризуются резко выраженной натриевой щелочностью (по масс-спектрометрии среднее содержание Na – 57194, K – 220 г/т), бедны Fe, Mg и редкими землями

($\Sigma TR=8,9$ г/т). В них несколько повышены значения тяжелых элементов (Cr до 354,7 и Ni – 237,3 г/т). В основном выявляется геохимическая специализация даек на редкие элементы (Ta, Nb, Sn) и редкие земли (Li, Rb) при неравномерном их распределении (табл. 2).

В отличие от онгонитоподобных даек других рассматриваемых участков здесь определены еще аномальные значения W и Mo. Кроме того, повышены значения Cu (320,1), Zn (125,1), Pb (до 90,44 г/т) и отмечаются весовые содержания As (12,22), Au (до 0,94), In (до 1,19) и Pd (0,36 г/т).

Таблица 2

Содержание редких элементов в кварцевых альбитофирах (г/т). Результаты анализов ICP-MS. Аналитик С.Н. Полежаев

Проба	Ta	Nb	Be	Li	Rb	Cs	Sn	W	Mo
КР-1	18,77	31,42	1,54	31,58	25,63	3,49	23,61	414,40	6,80
КР-2	6,30	26,72	2,57	342,20	112,20	24,20	27,89	113,88	1,87
КР-3	19,68	63,05	3,20	80,20	28,26	6,00	10,96	112,02	32,28
КР-4	20,39	69,63	2,20	47,00	23,81	5,88	20,96	141,88	6,66
КР-5	8,97	31,87	3,31	21,10	81,36	15,97	6,37	7,16	2,34
КР-6	2,66	9,66	1,18	211,40	151,80	27,99	11,41	6,29	2,04
КР-7	14,60	41,66	2,43	60,30	36,40	5,99	12,82	141,48	3,87
Среднее	13,5	39,14	2,35	141,97	65,64	12,79	16,29	133,87	7,98

В онгонитах в большей степени проявлена тантал-ниобиевая и вольфрамовая геохимическая специализация (Nb/Ta – 3, W/Sn – 8,2 раза) при преобладании Li среди редких щелочей (Li:Rb:Cs=11,1:5,1:1).

Как видно, на рудопроявлении Караузек в габброидах локализовались кварц-касситеритовые прожилки и дайки топазовых онгонитов, контролируемые наложенной трещинной тектоникой северо-восточного простирания. По происхождению они чужды габброидам и, вероятно, связаны с глубинными остаточными магматическими очагами. В связи с незначительными размерами оловорудные кварцевые жилы и онгонитовые дайки не имеют самостоятельного практического значения, но, как и на других участках, являются важным индикатором скрытого редкометаллического оруденения. Учитывая близость Ново-Ахмировского редкометаллического объекта и значительную закрытость территории рыхлыми отложениями, на площади Ахмировского участка необходима постановка глубинных поисково-оценочных работ.

Чечекский пояс в Иртышской зоне смятия объединяет онгонитовые дайки редкометаллического и ультраредкометаллического типов (Щерба и др., 2000). Нашими исследованиями в этих дайках по результатам ICP-MS определены повышенные содержания щелочей (K+Na=9,1 мас. %) и редких щелочей ($\Sigma Li+Rb+Cs=1671,5$ г), аномальные значения W (207,4), Sn (18,23), Mo (8,35), U (8,78 г/т). Содержания Ta, Nb, Rb на уровне кларков, сумма редких земель невысокая (20,44 г/т). Для Ахмировского и Чечекского дайковых поясов температура кристаллизации расплавов оценена в 560–605 °C при давлении 3,5–4,5 кбар (Соколова и др., 2016; Хромых и др., 2018).

Выводы. В настоящее время важнейшая задача заключается в разработке новых технологий глубинного геологического прогноза скрытых месторождений как одного из главных резервов восполнения минерально-сырьевой базы на редкометаллическое сырье в Казахстане. В соответствии с целью данных исследований уточнены закономерности формирования крупных

поясов даек порфирированного облика в общей структуре Большого Алтая, различающихся по геотектонической позиции, возрасту, особенностям вещественного состава и специфике рудоносности.

В результате исследований, а также сопоставления с другими регионами, установлено, что в геологических структурах Восточного Казахстана, входящего в общую систему Центрально-Азиатского пояса, в герцинский цикл сформировались две разновозрастные группы дайковых поясов габбро-диорит-гранодиорит-плагиогранитовой серии: добатолитового (C_{2-3} - C_3) и постбатолитового типов (P_2). Ранняя группа даек образовалась в коллизионной геодинамической обстановке, фиксируется протяженными дайковыми поясами северо-западного направления, с которыми ассоциируются промышленные золоторудные месторождения. Вторая группа даек северо-восточного направления сформировалась в постколлизионной (орогенной) обстановке, среди которых к онгонитам относятся поздние дайки кварцевых порфиров и кварцевых альбитофиров миролюбовского комплекса (P_2). Предполагается, что они являются производными остаточных магматических очагов. Онгониты характеризуются натровой щелочностью и обогащены фтором, главные породообразующие минералы – альбит, кварц и калиевый полевой шпат. По результатам лабораторных работ установлена геохимическая специализация онгонитов на редкие металлы и редкие щелочи (Ta, Nb, Li, Sn, W др.). Исследования показали, что онгонитоподобные дайки имеют пострудный характер, что подтверждается секущим их расположением по отношению к рудным телам и другими факторами. Кроме того, в пределах этих даек не установлено наличие редкометаллического оруденения практической значимости. Однако широкое развитие габбро-диорит-гранодиорит-плагиогранитовых даек в пределах известных и предполагаемых рудных полей, а также геохимическая специализация слагающих дайки пород позволяет рассматривать их в качестве поискового индикатора скрытых редкометаллических объектов, что имеет и научное, и прикладное значение (Ярмолюк и др., 2016). Изучение подобных дайковых образований необходимо для реконструкции геодинамических обстановок, при составлении корреляционных схем гранитоидного магматизма и изучения рудообразующих процессов (Хомичев, 2010; Щерба и др., 2000). Все это, несомненно, может быть использовано в практике геологического картирования, особенно на закрытых территориях.

Список использованных источников

- Анникова, И.Ю., Владимиров, А.Г., Гавришук, О.А., Смирнов, С.З. (2016). Геология и минералогия Алашанского месторождения сподуменовых гранит-порфиров (Горный Алтай). *Геология рудных месторождений*, 58, 5, 451-475.
- Антипин, В.С., Андреева, И.А., Коваленко, В.И., Кузнецов, В.А. (2009). Геохимические особенности онгонитов Ары-Булакского массива, Восточное Забайкалье. *Петрология*, 17, 6, 601-612.
- Бескин, С.М., Марин, Ю.Б. (2017). Классификация пегматитовых систем. *Матер. 3 междунар. геол. конф. "Граниты и эволюция Земли: мантия и кора в гранитообразовании"*. 28-31 августа. ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, Россия, 40-42.
- Богданова, К.Г. (1960). Петрология дайковых меланократовых пород Восточной Калбы. *Мат-лы ВСЕГЕИ. Нов. сер.*, 33, 131-140.
- Владимиров, А.Г., Крук, Н.Н., Хромых, С.В. и др. (2008). Пермский магматизм и деформации литосферы Алтая как следствие термических процессов в коре и мантии. *Геология и геофизика*, 49, 7, 621-636.
- Дергачев, В.Б. (1989). Два типа онгонитов и эльванов. *Доклады АН СССР*, 306, 5, 1216-1219.
- Куйбида, М.Л., Крук, Н.Н., Владимиров, А.Г., Полянский, Н.В., Николаева, И.В. (2009). U-Pb-изотопный возраст, состав и источники плагиогранитов Калбинского хребта (Восточный Казахстан). *Доклады РАН*, 424, 1, 84-88.
- Поцелуев, А.А., Рихванов, Л.П., Владимиров, А.Г., Анникова, И.Ю. и др. (2008). Калгутинское редкометаллическое месторождение. (Горный Алтай): магматизм и рудогенез. Томск: SST.
- Пушко, Е.П. и др. (1978). О находке литий-фтористых гранит-порфиров (аналогов онгонитов) в Калба-Нарымском рудном поясе. *Геология, геохимия и минералогия месторождений редких элементов*, 1, 5, 3-11.
- Соколова, Е.Н., Смирнов, С.З., Хромых, С.В. (2016). Условия кристаллизации, состав и источники редкометаллических магм при формировании онгонитов Калба-Нарымской зоны Восточного Казахстана. *Петрология*, 24, 2, 168-193.
- Хомичев, В.Л. (2010). Плутоны – дайки – оруденение. Монография. Новосибирск: СНИИГГИМС.
- Хромых, С.В., Котлер, П.Д., Гурова, А.В., Семенова, Д.В. (2018). Посторогенные дайковые пояса Алтайской аккреционно-коллизонной системы: геологическая позиция, состав и возраст. *Корреляция алтаид и уралит: глубинное строение литосферы, стратиграфия, магматизм, метаморфизм, геодинамика и металлогения*, 2-6 апреля, Новосибирск, Россия, 161-162.
- Щерба, Г.Н., Беспяев, Х.А., Мысник, А.М. и др. (2000). Большой Алтай (геология и металлогения). Кн. 2. Металлогения. Алматы: РИО ВАК РК.
- Ярмолюк, В.В., Лыхин, Д.А., Козловский, А.М. и др. (2016). Состав, источники и механизмы формирования редкометаллических гранитоидов позднепалеозойской Восточно-Саянской зоны щелочного магматизма (на примере массива Улан-Тологай). *Петрология*, 24, 5, 515-536.
- Dyachkov, B., Mizernaya, M., Kusmina, O., Mizerny, A., Oitseva, T. (2017). Main types of gold deposits of the Eastern Kazakhstan. *17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, Albena, Bulgaria*, 17, 11, 299-306.
- Han, C., Xiao, W., Zhao, G., Su, B., Sakyi, P.A., Ao, S., Wan, B., Zhang, J., Zhang, Z., Wang, Z. (2014). Mid-Late Paleozoic metallogenesis and evolution of the Chinese Altai and East Junggar Orogenic Belt, NW China, Central Asia. *Journal of Geosciences*, 59, 255-274.
- Khromykh, S.V., Tsygankov, A.A., Kotler, P.D. et al. (2016). Late Paleozoic granitoids magmatism of Eastern Kazakhstan and Westwrm Transbaikalia: Plume model test. *Russian Geology and Geophysics*, 57, 5, 773-789. Elsevier: ISSN 1068-7971. EISSN 1878-030X.
- Mizernaya, M., Dyachkov, B., Miroshnikova, A., Mizerny, A., Orazbekova, G. (2017). Large sulfide-quartz stockwork gold deposits of Kazakhstan - formation conditions and predicting criteria. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3, 82-88.
- Mizerny, A.I., Miroshnikova, A.P., Mizernaya, M., Diachkov, B.O. (2017). Geological and structural features, magmatism and mineralization of Sekysivske and Vasykivske Stockwork gold deposits (Kazakhstan). *Naukovy Visnyk Natsionalnoho Hirmychoho Universytetu*, 3, 5-12.

References

- Annikova, I.Yu., Vladimirov, A.G., Gavriushkina, O.A., Sмирнов, S.Z. (2016). Geologiya i mineralogiya Alakhinskogo mestorozhdeniya spodumenovyykh granit-porfirov (Gornyy Altay). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, 58, 5, 451-475. [in Russian]
- Antipin, V.S., Andreeva, I. A., Kovalenko, V. I., Kuznetsov, V. A. (2009). Geokhimicheskie osobennosti ongonitov Ary-Bulakskogo massiva, Vostochnoe Zabaikal'e. *Petrologiya*, 17, 6, 601-612. [in Russian]
- Beskin, S.M., Marin, Yu.B. (2017). Klassifikatsiya pegmatitovosnykh granitovyykh sistem. *Mater. 3 mezhdunar. geol. konf. "Granity i evoliutsiya Zemli: mantiya i kora v granitobrazovanii"*. 28-31 avgust. IGG UrO RAN, Ekaterinburg, Russia, 40-42. [in Russian]
- Bogdanova, K.G. (1960). Petrologiya daikovyykh melanokratovyykh porod Vostochnoi Kalby. *Mat-ly VSEGEI. Nov. ser.*, 33, 131-140. [in Russian]
- Dergachev, V.B. (1989). Dva tipa ongonitov i el'vanov. *Doklady AN SSSR*, 306, 5, 1216-1219. [in Russian]
- Dyachkov, B., Mizernaya, M., Kusmina, O., Mizerny, A., Oitseva, T. (2017). Main types of gold deposits of the eastern Kazakhstan. *17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, Albena, Bulgaria*, 17, 11, 299-306.
- Han, C., Xiao, W., Zhao, G., Su, B., Sakyi, P.A., Ao, S., Wan, B., Zhang, J., Zhang, Z., Wang, Z. (2014). Mid-Late Paleozoic metallogenesis and evolution of the Chinese Altai and East Junggar Orogenic Belt, NW China, Central Asia. *Journal of Geosciences*, 59, 255-274.
- Homichev, V.L. (2010). Plutony – dajki – orudnenie. Novosibirsk: SNIIGGIMS. [in Russian]
- Hromykh, S.V., Kotler, P.D., Gurova, A.V., Semenova, D.V. (2018). Postorogennye dajkovye pojasa Altajskoj akkrecionno-kolliizionnoj sistemy: geologicheskaja pozicija, sostav i vozrast. *Korrelyatsiya altaid i uralid: glubinnoe stroenie litosfery, stratigrafija, magmatizm, metamorfiz, geodinamika i metallogeniya*. 2-6 april, Novosibirsk, Russia, 161-162. [in Russian]
- Jarmoljuk, V.V., Lyhin, D.A., Kozlovskij, A.M. et al. (2016). Sostav, istochniki i mehanizmy formirovaniya redkometallichnykh granitoidov pozdnepaleozojskoj Vostochno-Sajanskoy zony shhelochnogo magmatizma (na primere massiva Ulan-Tologaj). *Petrologiya*, 24, 5, 515-536.
- Khromykh, S.V., Tsygankov, A.A., Kotler, P.D. et al. (2016). Late Paleozoic granitoids magmatism of Eastern Kazakhstan and Westwrm Transbaikalia: Plume model test. *Russian Geology and Geophysics*, 57, 5, 773-789. Elsevier: ISSN 1068-7971. EISSN 1878-030X.
- Kuibida, M.L., Kruk, N.N., Vladimirov, A.G., Polianskii, N.V., Nikolaeva, I.V. (2009). U-Pb-izotopnyi vozrast, sostav i istochniki plagiogranitov Kalbinskogo khrebra (Vostochnyi Kazakhstan). *Doklady RAN*, 424, 1, 84-88. [in Russian]
- Mizernaya, M., Dyachkov, B., Miroshnikova, A., Mizerny, A., Orazbekova, G. (2017). Large sulfide-quartz stockwork gold deposits of Kazakhstan - formation conditions and predicting criteria. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3, 82-88.

Mizerny, A.I., Miroshnikova, A.P., Mizernaya, M., Diachkov, B.O. (2017). Geological and structural features, magmatism and mineralization of Sekysivske and Vasylykivske Stockwork gold deposits (Kazakhstan). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 5-12.

Potseluev, A.A., Rikhvanov, L.P., Vladimirov, A.G., Annikova, I.Iu. et al. (2008). Kalgutinskoe redkometal'noe mestorozhdenie (Gornyi Altai): magmatizm i rudogenez. Tomsk: SST. [in Russian]

Pushko, E.P. et al. (1978). O nakhodke litii-floristykhn granit-porfirov (analogov ongonitov) v Kalba-Narymskom rudnom polose. *Geologiya, geokhimiya i mineralogiya mestorozhdenii redkikh elementov*, 5, 3-11. [in Russian]

Shherba, G.N., Bespaev, H.A., Mysnik, A.M. et al. (2000). Bol'shoj Altaj (geologiya i metallogeniya). Kn. 2. Metallogeniya. Almaty: RIO VAK RK. [in Russian]

Sokolova, E.N., Smirnov, S.Z., Khromykh, S.V. (2016). Usloviia kristallizatsii, sostav i istochniki redkometal'nykh magm pri formirovanii ongonitov Kalba-Narymskoi zony Vostochnogo Kazakhstana. *Petrologiya*, 24, 2, 168-193. [in Russian]

Vladimirov, A.G., Kruk, N.N., Khromykh, S.V. et al. (2008). Permskii magmatizm i deformatsii litosfery Altaia kak sledstvie termicheskikh protsessov v kore i mantii. *Geologiya i geofizika*, 49, 7, 621-636. [in Russian]

Надійшла до редколегії 17.08.19

B. Dyachkov, Dr. Sci. (Geol.-Min.), NSA of KR, Prof.,
E-mail: bdyachkov@mail.ru;
M. Mizernaya, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
E-mail: mizernaya58@bk.ru;
S. Aitbayeva, Doctoral student,
E-mail: AitbayevaSS@mail.ru;
A. Miroshnikova, PhD,
E-mail: Anastasiya-2588@mail.ru;
O. Kuzmina, PhD,
E-mail: kik_kuzmins@mail.ru;
East Kazakhstan state technical university named. D. Serikbaev,
19 Serikbaeva Str., Ust Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan

ONGONITE DIKES OF EASTERN KAZAKHSTAN AND THE SPECIFICITY OF THEIR ORE CONTENT

Goal of the research is to study regularities, age, material composition and ore content of ongonite-like dike belts of East Kazakhstan.

Methods are field works carried out within Kalba-Narym shear zone where dike belts are developed. Geological and structural position of dikes and their age ratio to granitoids of Kalba-Narym pluton and ore formations have been determined. The samples were selected from varieties of ongonite dikes. Microprobe analyses have been carried out on a scanning electron microscope JSM 6390 with an energy-dispersive add-on device, besides, mass-spectrometer researches have been conducted on ICP-MS. The purpose of these is to identify mineralogical and geochemical specialization of dike rocks.

Findings. The following has been found due to the conducted researches and comparison analysis with other regions: Two groups of heterochronous dike belts were formed during Hercynian Period in geological structures of East Kazakhstan comprised in general system of Central Asian belt. The dike belts belong to gabbro-diorite – granodiorite – plagiogranite series, and the groups are of pre-batholite (C_{2-3} – C_3) and post-batholite (P_2) types. Late post-batholite dikes of quartz porphyrites and quartz albitophytes of Mirolubovskiy complex (P_2) refer to ongonites. Probably, they are derivatives of deep residual magma chambers. In the course of the work, ongonites geochemical differentiation into rare metals (Ti, Nb, Li, Sn, W and other) and rare alkalies has been established. The researches have shown that ongonite-like dikes are of post-mineral nature that is proved by their position in relation to ore bodies and by other factors. Besides, no rare metal ore of practical significance has been found within these dikes.

Scientific novelty and practical application. It can be assumed that greater development of gabbro-diorite – granodiorite – plagiogranite dikes within the known and supposed ore fields, as well as specialization of rocks that dikes are composed of, enable to consider them as prospecting indicators of concealed rare metal objects. To study dike formations of this kind is very important for reconstruction of geodynamic environments, for development of correlation patterns of granitoid magmatism and for studying ore formation processes. By all means, all this can be used in geologic mapping practice, especially on the closed territories.

Keywords: dikes, ongonites, age, composition, rare metals, forecasting, East Kazakhstan, Bolshoi Altai (BA).

Б. Дьячков, д-р геол.-минералог. наук, акад. НАН РК, проф.,
E-mail: bdyachkov@mail.ru;
М. Мізерна, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: mizernaya58@bk.ru;
С. Айтбаєва, докторант,
E-mail: AitbayevaSS@mail.ru;
А. Мірошнікова, PhD,
E-mail: Anastasiya-2588@mail.ru;
О. Кузьміна, PhD, старш. викладач,
E-mail: kik_kuzmins@mail.ru;
Східно-Казахстанський державний технічний університет ім. Д. Серікбаєва,
вул. Д.Серікбаєва, 19, м. Усть-Каменогорськ, 070004, Республіка Казахстан

ОНГОНІТОВІ ДАЙКИ СХІДНОГО КАЗАХСТАНУ ТА СПЕЦИФІКА ЇХНЬОЇ РУДОНОСНОСТІ

Метою даних досліджень є вивчення закономірностей, віку, матеріального складу і рудоносності онгонітоподібних дайкових поясів Східного Казахстану.

Методика робіт полягала у проведенні польових досліджень у межах розвитку дайкових поясів у Калба-Наримській зоні зминання. Визначалася геолого-структурна позиція даек та їх вікове співвідношення з гранітоїдами Калба-Наримського плутону і рудними утвореннями. Проводився відбір проб з різновидів онгонітових даек. Виконувалися мікрозондові аналізи на скануючому електронному мікроскопі (JSM 6390) з енергодисперсійною приставкою і мас-спектрометричні дослідження (ICP-MS) з метою виявлення мінеральної та геохімічної спеціалізації дайкових порід.

У результаті аналізу досліджень, а також зіставлення з іншими регіонами, встановлено, що у геологічних структурах Східного Казахстану, який входить до загальної системи Центрально-Азійського пояса, у герцинський цикл сформувалися дві різновікові групи дайкових поясів габро-діорит-гранодіорит-плагіогранітової серії: добатоітового (C_{2-3} – C_3) і постбатоітового (P_2) типів. Серед них до онгонітів належать пізні постбатоітові дайки кварцових порфірів і кварцових альбітофірів Міролюбівського комплексу (P_2). Можливо вони є похідними глибинних залишкових магматичних воєнищ. У ході робіт встановлено геохімічну спеціалізацію онгонітів на рідкісні метали та рідкісні луи (Ti, Nb, Li, Sn, W та ін.).

Дослідження показали, що онгонітоподібні дайки мають пострудний характер, що підтверджується їхнім січним становищем відносно рудних тіл та іншими факторами. Крім того, у межах цих даек не встановлено наявності рідкіснометалічного зруденіння практичної значущості.

Широкий розвиток габро-діорит-гранодіорит-плагіогранітових даек у межах відомих і передбачуваних рудних полів, а також геохімічна спеціалізація, порід, що складають дайки, дозволяє розглядати їх як пошуковий індикатор прихованих рідкометалічних об'єктів. Вивчення подібних дайкових утворень має важливе значення для реконструкції геодинамічних обстановок, при складанні кореляційних схем гранітоїдного магматизму і вивченні рудоутвірних процесів. Усе це, безсумнівно, може бути використано в практиці геологічного картування, особливо на закритих територіях.

Ключові слова: дайки, онгоніти, вік, склад, рідкісні метали, прогнозування, Східний Казахстан, Великий Алтай.

УДК 553:332.122.5(477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.10>

В. Волков, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: volkovvp49@gmail.com;
Л. Горошкова, д-р екон. наук, проф.,
E-mail: goroshkova69@gmail.com;
Запорізький національний університет,
вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69600, Україна;
Є. Хлобистов, д-р екон. наук, проф.,
E-mail: ievgen.khlobystov@ukr.net;
Національний університет "Києво-Могилянська академія",
вул. Григорія Сковороди, 2, м. Київ, 04655, Україна

РОЗВИТОК ЕКСПОРТНО-ІМПОРТНИХ ОПЕРАЦІЙ У ВУГІЛЬНІЙ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

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

У результаті проведених досліджень сформовано системний підхід до управління видобутком, використанням, експортом та імпортом вугільних ресурсів країни.

Порівняння експортних та імпортних цін на коксівне вугілля та антрацит дозволило дійти висновку про неефективність експортно-імпортних операцій, оскільки експортні ціни на антрацит є нижчими за імпортні. Доведено, що в ситуації зниження видобутку вугілля в Україні експорт за низькими цінами взагалі є збитковим для економіки країни.

Був проведений аналіз географічної структури експорту та імпорту вугілля кам'яного, антрациту (2701) та коксу і напівкоксу, вугілля ретортного (2704). Установлено, що основними імпортерами вугілля кам'яного, антрациту є Російська Федерація та США, експортні потоки були зосереджені до таких країн, як Болгарія, Туреччина, Бельгія та Російська Федерація.

Встановлено, що кокс і напівкокс, вугілля ретортне (2704) протягом 2011–2018 рр. імпортувалось переважно з Російської Федерації, США та Польщі. Експортні потоки були направлені до Російської Федерації.

Запропоновано використання системного підходу до раціонального видобутку, використання мінерально-сировинної бази країни з одночасним врахуванням експортно-імпортних потоків і цінової кон'юнктури зовнішнього та внутрішнього ринків з урахуванням ресурсної складової безпеки держави.

Ключові слова: мінерально-сировинна база, паливно-енергетичні ресурси, вугілля кам'яне, вугілля коксівне, антрацит, управління.

Постановка проблеми. Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази (МСБ) України на період до 2030 р. є вагомим чинником подолання кризових явищ в економіці України та забезпечення умов її сталого розвитку, оскільки в ній разом із відтворенням запасів корисних копалин передбачено проведення геологічних досліджень, спрямованих на їхній приріст (Закон України..., 2011). Вугілля в Україні – єдина енергетична сировина, запасів якої потенційно достатньо для забезпечення енергетичної безпеки держави, але його видобуток останніми роками в країні суттєво знижується з політичних та економічних причин. Саме тому існує необхідність формування системи управління забезпечення країни вугіллям за умови ощадливого ставлення до його видобування та використання, у тому числі формування ефективних експортно-імпортних потоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам економіко-геологічного вивчення надр, надрокористування присвячені роботи І. Андрієвського, В. Бодюка, С. Довгого, М. Коржнева, М. Костенка, М. Красножена, Є. Куліша, М. Курило, О. Лисенка, В. Матюхи, В. Михайлова, В. Міщенко та ін. (Андрієвський та ін., 2011; Бодюк, 2013; Довгий та ін., 2007; Коржнев та ін., 2006; Красножен, 2014, 2015; Лисенко та ін., 2017; Михайлов та ін., 2006). У цих публікаціях розглядаються умови утворення та будови вугільних пластів і вугленосних формацій, природні типи, якість і властивості вугілля, досліджуються питання геологічної будови, вугленосності, якості вугілля, гірничо-геологічні умови розробки і ресурси вугільних басейнів і родовищ України (Нагорний, 2005), побудована балансово-оптимізаційна модель визначення обсягів власного видобутку вугілля та його імпортування з урахуванням впливу заходів з техніко-економічної модернізації та реконструкції (Білан, 2017). Низка робіт присвячена оцінці ризиків освоєння родовищ вугілля з незначними запасами (Рудько та Бала, 2017; Рудько та ін., 2011). Крім того, розглядаються проблеми обґрунтування ціни товарної продукції в геолого-економічній оцінці вугільних родовищ (Рудько та ін., 2018).

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. З метою забезпечення можливості виконання Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази важливим є пошук шляхів підвищення рівня ефективності використання МСБ країни та створення системи управління збалансованим видобутком, використанням, експортом та імпортом корисних копалин. Це, у першу чергу, стосується вугільних ресурсів, як основи безпеки країни. Саме тому, на нашу думку, доцільно здійснювати не тільки планування та прогнозування видобутку вугільних ресурсів України як складової системи управління мінерально-сировинною базою країни, а й формувати ефективну систему управління експортно-імпортними потоками.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розробка системного підходу до управління видобутком, використанням, експортом та імпортом вугільних ресурсів України на основі економічних параметрів розвитку кон'юнктури світового та вітчизняного ринку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вугілля – тверда горюча осадова порода рослинного походження. Виділяють вугілля буре, бітум (у бурому бітумвмістному вугіллі) та вугілля кам'яне. Україна володіє значними запасами вугілля всіх генетичних стадій вуглефікації – від бурих до антрацитів.

Загальні ресурси вугілля України становлять: 112,3 млрд т, розвідані запаси – 51,9 млрд т; з них коксівного вугілля – 17,1 млрд т (30,5 %), антрацитів – 7,6 млрд т (13,5 %). Запаси вугілля коксівного та антрацитів становлять відповідно 31,5 % та 14,3 % від запасів кам'яного вугілля України (Примушко, 2018).

Кам'яне вугілля зосереджене у двох басейнах: Донецькому та Львівсько-Волинському. Вугленосність басейнів приурочена до відкладів карбонового віку.

Донецький басейн займає територію Дніпропетровської, Донецької, Луганської та Харківської областей України, а також Ростовської області Росії. Загальна кількість робочих пластів басейну досягає 120, з них експлуатуються 65. Глибина залягання вугільних пластів збільшується в північно-східному напрямку від 60–70 м

до 1500–1700 м. Вугільні пласти басейну віднесені до тонких, потужність яких майже не перевищує 1,2 м. Вугілля різноманітне за якістю: від довгополум'яного до антрациту згідно з ДСТУ 3472-96. Глибина розробки вугільних пластів у басейні коливається від 200 до 1350 м і становить у середньому 730 м.

Львівсько-Волинський басейн поширений у Львівській і Волинській областях і є південно-східним продовженням Люблінського басейну Польщі. Потужність кам'яновугільних відкладів закономірно збільшується від 600 м на північному сході, до 1200 м на південному заході. Найбільш значна промислова вугленосність приурочена до відкладів серпухівського ярусу, що вміщує 50 вугільних пластів і прошарків. Робочу потужність мають від трьох (на сході) до дев'яти (на заході) вугільних пластів. Пласти характеризуються як тонкі, мають потужність 0,7–1,2 м, дуже рідко досягають середньої потужності 1,2–1,5 м. У відкладах башкірського ярусу виявлено понад десять вугільних пластів; з них чотири мають промислове значення. За маркуванням вугілля довгополум'яне газове, газове, жирне, коксівне (Примушко, 2017).

Відповідно до офіційної класифікації Державної служби геології та надр, наведеної в (Примушко та ін., 2017), виокремлюють буре вугілля та кам'яне вугілля. У свою чергу є такі різновиди кам'яного вугілля, як коксівне вугілля й антрацит та інше кам'яне вугілля. У зазначеному виданні не наводяться дані щодо експортно-імпортних операцій, що унеможлиблює їхній аналіз за даними саме цього джерела.

ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України" (Примушко, 2018) і Міністерство енергетики та

вугільної промисловості України (Інформаційна довідка..., 2016, 2017, 2018, 2019) наводять дані щодо видобутку кам'яного вугілля, коксівного вугілля, антрациту та іншого кам'яного вугілля, які, до речі, не збігаються між собою (Волков і Горошкова, 2019). Зазначені розбіжності суттєво ускладнюють процес дослідження. У названих офіційних виданнях відсутні дані щодо експортно-імпортних операцій.

У збірнику Державної служби статистики України (Статистичний щорічник України..., 2014, 2018) "Паливно-енергетичні ресурси України" виокремлюють дані щодо виробництва та експортно-імпортних операцій за такими позиціями: коксівне вугілля, вугілля інше/антрацит, кокс/дьюготь. Обсяги виробництва відрізняються від обсягів видобутку на величину втрат ресурсів у процесі видобутку.

Проаналізуємо дані з перерахованих джерел (результати аналізу представлено в табл. 1–3).

Отримані результати можливо пояснити таким чином. Спад у виробництві кам'яного вугілля спостерігався з 2014 р. Він був наслідком початку бойових дій на території Донецької та Луганської областей. З їхнім початком 69 із 148 українських шахт вимушені були припинити видобуток вугілля, 7 шахт було зруйновано в ході бойових дій, останні ж функціонують у режимі підтримки життєдіяльності. На шахти, які сьогодні не функціонують, у 2013 р. припадало 40 % видобутку вугілля загалом по Україні (Бобро, 2018; Гончар та ін, н.д.). Аналогічні тенденції характерні й для динаміки експортних операцій. Зменшення обсягів видобутку і виробництва призвело до певного зменшення експорту.

Таблиця 1

Динаміка виробництва, експорту, імпорту коксівного вугілля в Україні протягом 2014–2017 рр.

Рік	Обсяг виробництва коксівного вугілля, млн т	Обсяг імпорту, млн т	Обсяг експорту, млн т	Темп зростання виробництва, %	Темп зростання імпорту, %	Темп зростання експорту, %
2014	12,022	9,706	1,448			
2015	6,064	5,748	0,494	50,44	59,22	34,12
2016	6,509	8,109	0,336	107,34	141,08	68,02
2017	5,234	9,510	0,560	80,41	117,28	166,67

Таблиця 2

Динаміка виробництва, експорту, імпорту антрациту в Україні протягом 2014–2017 рр.

Рік	Обсяг виробництва вугілля іншого/антрациту, млн т	Обсяг імпорту, млн т	Обсяг експорту, млн т	Темп зростання виробництва, %	Темп зростання імпорту, %	Темп зростання експорту, %
2014	33,208	4,989	5,586			
2015	23,853	8,850	0,000	71,83	177,39	–
2016	25,122	7,539	0,184	105,32	85,19	–
2017	18,933	10,268	0,076	75,36	136,20	41,30

Таблиця 3

Динаміка виробництва, експорту, імпорту коксу в Україні впродовж 2014–2017 рр.

Рік	Обсяг виробництва коксу/дьюготю, млн т	Обсяг імпорту, млн т	Обсяг експорту, млн т	Темп зростання виробництва, %	Темп зростання імпорту, %	Темп зростання експорту, %
2014	14,644	1,636	1,158			
2015	12,267	2,037	0,240	83,77	124,51	20,73
2016	13,442	1,612	0,257	109,58	79,14	107,08
2017	10,696	1,550	0,222	79,57	96,15	86,38

У зовнішньоекономічній діяльності здійснюється класифікація вугілля відповідно до товарних позицій за кодами УКТЗЕД. Використовують такі товарні позиції: вугілля кам'яне, антрацит (код 2701); лігніт, буре вугілля (код 2702); кокс і напівкокс; вугілля ретортне (код 2704).

Проаналізуємо динаміку видобутку та експорту-імпорту зазначених типів вугілля (табл. 4–5).

У табл. 4 наведено результати аналізу експортно-імпортних операцій щодо вугілля кам'яного, антрациту. Як бачимо, протягом 2011–2017 рр. зменшувались обсяги експорту, натомість обсяги імпорту збільшувались. Зазначені тенденції цілком збігаються з обсягами видобутку

корисної копалини в Україні. Як зазначено вище, основна причина – початок військових дій на Донбасі та зменшення видобутку в Україні. Експортні ціни на антрацит протягом досліджуваного періоду знижувались із 110,875 дол США/т у 2011 р. до 85,984 дол США/т у 2016 р. Із 2016 р. ціни почали зростати і становили в 2018 р. 135,569 дол США/т. Імпортні ціни також знижувались – із 217,243 дол США/т (у 2011 р.) до 93,758 дол США/т (у 2016 р.). Порівняння експортних та імпортних цін дозволяє дійти висновку про неефективність експортно-імпортних операцій, оскільки експортні ціни на антрацит є нижчими за імпортні. У ситуації

зниження видобутку копалини в Україні експорт за низькими цінами взагалі є збитковим і тому, на нашу думку, його можливо вважати економічно недоцільним.

У табл. 5 наведено результати аналізу експортно-імпорتنних операцій щодо коксу, напівкоксу, вугілля ретортного. Як бачимо, протягом 2011–2017 рр. зменшувались обсяги експорту, натомість обсяги імпорту збільшувались. Зазначені тенденції цілком збігаються з обсягами видобутку корисної копалини в Україні. Експортні ціни протягом досліджуваного періоду знижувались із

379,328 дол США/т в 2011 р. до 126,451 дол США/т у 2016 р. З 2016 р. ціни почали зростати і становили в 2018 р. 264,055 дол США/т. Імпортні ціни також знижувались – з 385,781 дол США/т (у 2011 р.) до 182,410 дол США/т (у 2016 р.). Порівняння експортних та імпорتنних цін дозволяє дійти висновку про неефективність експортно-імпорتنних операцій, оскільки експортні ціни є нижчими за імпортні. У ситуації зниження видобутку копалини в Україні експорт за низькими цінами взагалі є збитковим для економіки країни.

Таблиця 4

Динаміка показників експорту та імпорту вугілля кам'яного, антрацит (код товарної позиції 2701)

Роки	Обсяг видобутку, млн т	Обсяг імпорту, млн т	Вартість імпорту, млн дол	Ціна імпорту, дол/т	Обсяг експорту, млн т	Вартість експорту, млн дол	Ціна експорту, дол/т	Частка експорту у загал. обсязі видобутку, %
2011	54,380	12,708782	2760,897000	217,243242	6,990843	775,109000	110,874897	12,8555
2012	55,553	14,764238	2637,028000	178,609150	6,114087	609,392000	99,670155	11,0059
2013	53,868	14,207715	1973,751000	138,921072	8,537365	737,009000	86,327456	15,8487
2014	39,135	14,697342	1773,195000	120,647325	7,046549	521,017000	73,939314	18,0057
2015	24,749	14,598166	1643,803000	112,603391	0,563131	53,651000	95,272681	2,2754
2016	26,838	15,647557	1467,091000	93,758470	0,520585	44,762000	85,984037	1,9397
2017	19,135	19,777741	2744,062000	138,744966	0,635760	105,494000	165,933686	3,3225
2018		21,387573	3035,349000	141,921152	0,063798	8,649000	135,568513	

Таблиця 5

Динаміка показників експорту та імпорту коксу і напівкоксу; вугілля ретортного (код товарної позиції 2704)

Рік	Обсяг видобутку коксівного кам'яного вугілля, млн т	Обсяг виробництва коксу і напівкоксу, коксівного газу, млн т	Темп зростання видобутку коксівного кам'яного вугілля, %	Темп зростання виробництва коксу і напівкоксу, %	Обсяг імпорту, млн т	Вартість імпорту, млн дол.	Ціна імпорту, дол./тону	Обсяг експорту, млн т	Вартість експорту, млн дол.	Ціна експорту, дол./тону	Частка експорту у загал. обсязі видобутку, %
2011	23,010	19,6			0,157003	60,561	385,731483	1,986896	753,685	379,327856	10,137
2012	23,984	18,9	104,23	96,43	0,500768	145,984	291,520225	2,576740	626,052	242,962813	13,634
2013	23,791	17,6	99,20	93,12	0,702043	190,290	271,051773	1,982785	404,990	204,253109	11,266
2014	18,332	13,9	77,05	78,98	1,636185	354,259	216,515247	1,157696	191,990	165,838009	8,329
2015	12,251	11,6	66,83	83,45	2,037207	398,571	195,645803	0,239563	38,217	159,527974	2,065
2016	13,091	12,7	106,86	109,48	1,612092	294,061	182,409565	0,257356	32,543	126,451297	2,026
2017	11,819	10,1	90,28	79,53	1,549604	449,353	289,979246	0,224619	46,598	207,453510	2,224
2018					0,839757	251,724	299,758144	0,025578	6,754	264,055047	

У табл. 6 наведено результати аналізу географічної структури експорту та імпорту вугілля кам'яного, антрациту (2701) та коксу і напівкоксу, вугілля ретортного (2704). Як бачимо, протягом 2011–2017 рр. коло країн, з яких здійснювався імпорт, залишається практично незмінним. Це Російська федерація, США, до 2015 року був Казахстан, із 2015 – Канада. Так, вугілля кам'яне, антрацит (2701) імпортувалось з Російської Федерації (60–62 %) та США (15–32 %). На початку бойових дій у Донецькій та Луганській областях частка імпорту з Російської Федерації (у 2015 р.) знизилася до 47,12 %, але з 2016 р. обсяг імпорту зріс до попереднього рівня.

Україна експортувала вугілля кам'яне, антрацит (2701) протягом 2011–2012 років до Болгарії, Туреччини та Бельгії. З 2013 р. – розпочати експорт до Словаччини, а з 2014 р. – до Російської Федерації. Причому протягом зазначених років експорт до Російської Федерації зростає з 9 % до 53 % у 2018 р. Зіставлення географії експорту та імпорту підтверджує зроблений висновок щодо економічної неефективності, оскільки, наприклад експорт та імпорт в одну й ту саму країну (Російську Федерацію), за умови, що ціни імпорту вищі за ціни експорту, економічно не є виправданим.

Як бачимо з табл. 6, імпорт коксу і напівкоксу, вугілля ретортного (2704) протягом 2011–2018 рр. здійснювався

переважно з Російської Федерації та Польщі у приблизно однаковій пропорції. Винятком став 2012 р., коли переважну більшість ресурсу імпортували з Польщі (65 %). З 2014 по 2017 рік Україна імпортувала кокс і напівкокс, вугілля ретортне з Китаю, з 2018 року – із США. У 2011–2013 рр. Україна експортувала ресурси до Ірану та Індії, у 2014, 2015 та 2018 рр. експортувала до Російської Федерації. Отримані результати щодо експорту та імпорту коксу і напівкоксу, вугілля ретортного (2704) свідчать про те, що зазначений ресурс експортується і імпортується до однієї і тієї самої країни – Російської Федерації. Ціна експорту при цьому нижча за ціну імпорту. Такі операції, на нашу думку, є економічно неефективними для країни, тим більш, що собівартість виробництва коксу в Україні досить висока.

Необхідність залучення зовнішніх джерел для забезпечення потреб економіки у вугіллі зумовлена недостатніми обсягами власного видобутку коксівного вугілля і високим умістом сірки в ньому, а також дефіцитом вугілля газової групи для потреб українських теплоелектростанцій. Крім того, нестача антрациту зумовлена тим, що більшість шахт опинились на непідконтрольній території Донецької та Луганської областей, що призвело до зниження обсягів його видобування.

Отримані результати свідчать про те, що вітчизняний експорт вугілля кам'яного, антрациту (2701) та коксу і напівкоксу, вугілля ретортного (2704) є недостатньо економічно ефективним, оскільки ціна на експортовані ресурси є занадто низькою. Крім того, звертає на себе увагу той факт, що Україна імпортує з Російської Федерації ті самі ресурси, які експортує. Вважаємо, що позиція Російської

Федерації пов'язана з намаганням використовувати МСР інших країн і більш ошадливо ставитись до власних. Аналогічна ситуація щодо сировинних ресурсів відома в металургії. Світові лідери металургійного виробництва вже протягом 20 років віддають перевагу імпорту сировинних складових, а саме руди та коксівного вугілля, не використовуючи власні поклади.

Таблиця 6

Географічна структура експорту та імпорту вугілля кам'яного, антрациту (2701) та коксу і напівкоксу, вугілля ретортного (2704)

Роки	Вугілля кам'яне, антрацит (2701)				Кокс і напівкокс, вугілля ретортне (2704)			
	імпорт		експорт		імпорт		експорт	
	Країна	Питома вага, %	Країна	Питома вага, %	Країна	Питома вага, %	Країна	Питома вага, %
2011	Російська Федерація	62,06	Болгарія	22,44	Російська Федерація	37,25	Іран	46,27
	США	30,09	Туреччина	17,22	Польща	35,34	Індія	12,52
	Казахстан	6,10	Бельгія	9,03	Чехія	18,15	США	8,03
	Інші	1,74	Інші	52,31	Інші	9,25	Інші	33,18
2012	Російська Федерація	61,44	Болгарія	17,90	Польща	95,40	Індія	41,29
	США	30,09	Туреччина	14,21	Російська Федерація	3,4	Російська Федерація	18,54
	Казахстан	6,22	Бельгія	9,55	Чехія	1,16	Іран	10,15
	Інші	2,25	Інші	58,34	Інші	0,04	Інші	30,02
2013	Російська Федерація	65,81	Туреччина	15,28	Польща	75,58	Індія	37,67
	США	25,23	Словаччина	11,54	Російська Федерація	18,76	Іран	14,60
	Казахстан	4,49	Болгарія	8,89	Казахстан	5,09	Туреччина	10,23
	Інші	4,46	Інші	64,29	Інші	0,57	Інші	37,50
2014	Російська Федерація	60,83	Туреччина	23,91	Польща	48,28	Індія	34,23
	США	17,97	Словаччина	9,77	Російська Федерація	34,79	Російська Федерація	10,56
	Казахстан	7,59	Російська Федерація	9,10	Китай	6,43	Грузія	9,82
	Інші	13,61	Інші	57,21	Інші	10,50	Інші	45,40
2015	Російська Федерація	47,12	Словаччина	75,51	Російська Федерація	36,36	Туреччина	28,95
	США	24,36	Туреччина	6,72	Польща	35,25	Грузія	18,35
	Казахстан	7,91	Греція	5,23	Китай	21,33	Російська Федерація	11,42
	Інші	20,61	Інші	12,53	Інші	7,06	Інші	41,28
2016	Російська Федерація	61,78	Словаччина	60,07	Польща	45,90	Грузія	27,75
	США	14,46	Російська Федерація	16,72	Російська Федерація	45,06	Туреччина	21,93
	Канада	6,43	Туреччина	15,87	Китай	6,25	Болгарія	14,20
	Інші	17,33	Інші	7,35	Інші	2,79	Інші	36,12
2017	Російська Федерація	56,57	Російська Федерація	54,48	Російська Федерація	55,38	Туреччина	25,26
	США	24,85	Словаччина	39,36	Польща	36,81	Індія	20,98
	Канада	6,64	Туреччина	2,43	Китай	3,61	Південна Африка	16,15
	Інші	11,94	Інші	3,72	Інші	4,20	Інші	37,62
2018	Російська Федерація	60,02	Російська Федерація	53,15	Російська Федерація	74,11	Російська Федерація	46,54
	США	29,89	Словаччина	37,01	США	9,86	Білорусь	31,85
	Канада	5,36	Республіка Молдова	8,37	Польща	9,34	Румунія	12,53
	Інші	4,74	Інші	1,47	Інші	6,69	Інші	9,09

Основними завданнями Загальнодержавної програми розвитку МСБ України на період до 2030 р. є відтворення та приріст запасів корисних копалин, і вирішити ці важливі завдання можливо не тільки шляхом проведення геологорозвідувальних робіт, а перш за все шляхом створення умов для більш раціонального видобутку та використання мінерально-сировинної бази країни та оптимізації експортно-імпортних операцій (*Шевченко та Воробйов, н. д.*). На нашу думку, вичерпність корисних

копалин і неефективні експортні операції, створюють загрозу ресурсній складовій безпеки держави. Крім того, серед оптимізаційних заходів можливо запропонувати такі: проводити дорозвідку родовищ, які розробляються, для продовження терміну експлуатації й реконструкції діючих підприємств; здійснювати пошуково-оцінювальні та геологорозвідувальні роботи на найперспективніших площах і родовищах вугілля. Такі заходи дозволять

збільшити обсяги видобутку власного вугілля зменшити його імпорт.

Особливої уваги набуває проблема раціонального використання ресурсів в умовах децентралізації управління та реформування адміністративно-територіального устрою країни. Нами неодноразово зверталась увага на важливість ресурсної складової розвитку як країни, так і територіальних громад та їхніх об'єднань. Саме забезпеченість ресурсами є додатковим пріоритетом щодо створення умов сталого розвитку громад, оскільки наявність корисних копалин на території громади забезпечує можливість отримання доходу від їхньої розробки (податкові надходження до бюджетів територіальних громад). Таким чином, наявність ресурсів, їх раціональний видобуток і використання є запорукою стабільного і збалансованого економічного розвитку країни та її територій.

Висновки і рекомендації. У результаті проведених досліджень сформовано системний підхід до управління видобутком, використанням, експортом та імпортом вугільних ресурсів країни.

Зіставлення вихідних даних з різних офіційних джерел дозволило дійти висновку про наявність певних розбіжностей, що суттєво ускладнюють процес дослідження. У зв'язку із цим потребує додаткової систематизація інформація, що наводиться в офіційній звітності в Україні.

Установлено, що спад у видобутку кам'яного вугілля спостерігався у 2014 р. Він був наслідком початку бойових дій на території Донецької та Луганської областей. Аналогічні тенденції характерні й для динаміки експортних операцій, оскільки зменшення видобутку призвело до зменшення обсягів експорту.

Отримані результати свідчать про те, що експортні та імпортні ціни на антрацит протягом досліджуваного періоду загалом знижувались. Порівняння експортних та імпортних цін дозволяє дійти висновку про неефективність експортно-імпортних операцій, оскільки експортні ціни на антрацит є нижчими за імпортні. У ситуації зниження видобутку копалини в Україні експорт за низькими цінами взагалі є збитковим й тому, на нашу думку, його можливо вважати економічно недоцільним.

Результати аналізу експортно-імпортних операцій щодо коксу, напівкоксу, вугілля ретортного свідчать про зменшення обсягів експорту та збільшення обсягів імпорту. Щодо цін, то як експортні, так і імпортні ціни протягом 2011–2015 рр. знижувались і почали зростати з 2016 р.

Був проведений аналіз географічної структури експорту та імпорту вугілля кам'яного, антрациту (2701) та коксу і напівкоксу, вугілля ретортного (2704). Основними імпортерами вугілля кам'яного, антрациту є Російська Федерація та США. Винятком щодо Російської Федерації став 2014 р., що можливо пов'язати із початком бойових дій. З 2015 р. ситуація змінилась – імпорт з Росії збільшився. Експортні потоки були зосереджені до таких країн, як Болгарія, Туреччина та Бельгія. З 2013 р. розпочато експорт до Словаччини, а з 2014 р. – до Російської Федерації. Зіставлення географії експорту та імпорту підтверджує зроблений висновок щодо економічної неефективності, оскільки, наприклад експорт та імпорт до однієї і тієї самої країни (Російської Федерації) за умови, що ціни імпорту вищі за ціни експорту, економічно не є виправданим.

Встановлено, що кокс і напівкокс, вугілля ретортне (2704) протягом 2011–2018 рр. імпортувалось переважно з Російської Федерації та Польщі. Отримані результати свідчать про те, що зазначений ресурс експортується та імпортується до однієї і тієї самої країни – Російської Федерації. Ціна експорту при цьому нижча за ціну імпорту. Отже, такі операції є економічно

неефективними для країни, тим більш, що собівартість виробництва коксу в Україні досить висока.

Запропоновано використання системного підходу до раціонального видобутку, використання мінерально-сировинної бази країни з одночасним урахуванням експортно-імпортних потоків і цінової кон'юнктури зовнішнього та внутрішнього ринків з урахуванням ресурсної складової безпеки держави.

Подальших досліджень потребує проблема оптимізації видобутку та використання корисних копалин, та їхнього впливу на розвиток територій та добробуту територіальних громад.

Список використаних джерел

- Андріївський, І.Д., Матюха, В.В., Мовчан, В.В. (2011). Сучасний стан і перспективи розвитку добувної промисловості України. *Мінеральні ресурси України*, 3, 8-14.
- Білан, Т.Р. (2017). Балансово-оптимізаційна модель визначення обсягів власного видобутку вугілля та його імпортування з урахуванням впливу заходів з модернізації та реконструкції на техніко-економічні. *Проблеми загальної енергетики*, 4 (51), 18-22.
- Бобро Д.Г. Вугільна промисловість України в умовах гібридної війни. Аналітична записка: Національний інститут стратегічних досліджень. Отримано з <http://www.niss.gov.ua/articles/1890/>
- 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. (2019). Управління раціональним видобуванням та використанням вугільних ресурсів України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 87. (у друці)
- Гончар, М., Чубук, А., Ішук, О. (н.д.). Гібридна війна в Східній Європі. Невосійний вимір. Енергетичний компонент. Центр глобалістики "Стратегія ХХІ". Отримано з <http://geostrategy.org.ua>
- Гошовський, С.В., Красножон, М.Д., Люта, Н.Г., Василенко, А.П., Костенко, М.М. (2014). Мінерально-сировинна база України. Стаття 1. Щодо необхідності внесення змін до Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року. *Мінеральні ресурси України*, 4, 4–7.
- 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.
- Інформаційна довідка про основні показники розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу України за 12 місяців 2015 року. (2016). Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. Отримано з http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/archive?cat_id=35081&page=6
- Інформаційна довідка про основні показники розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу України за 12 місяців 2016 року. (2017). Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. Отримано з http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/archive?cat_id=35081&page=6
- Інформаційна довідка про основні показники розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу України за 12 місяців 2017 року. (2018). Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. Отримано з http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/archive?cat_id=35081&page=6
- Інформаційна довідка про основні показники розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу України за 12 місяців 2018 року. (2019). Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. Отримано з http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/archive?cat_id=35081&page=6
- Коржнев, М.М., Михайлов, В.А., Міщенко, В.С. та ін. (2006). Основи економічної геології. К.: Логос.
- Красножон, М.Д. (2015). Мінерально-сировинна база України. Стаття 4. Паливно-енергетичні ресурси й перспективи їх наращування. *Мінеральні ресурси України*, 4, 1-6.
- 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.
- Нагорний, Ю.М., Нагорний, В.М., Приходченко, В.Ф. (2005). Геологія вугільних родовищ. Дніпропетровськ: НГУ.
- Примушко, С.І., Білошапська, Т.Д., Величко, В.Ф. (2018). Мінеральні ресурси України. К.: ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України". Отримано з <http://geoinf.kiev.ua/horyuchi-korysni-kopalyny/tverdi-horyuchi-korysni-kopalyny/>
- Рудько, Г.І. Курило, М.М., Бала, В.В., Маковський, Ю.С. (2018). Методи визначення (обґрунтування) ціни товарної продукції при геолого-економічній оцінці вугільних родовищ. *Мінеральні ресурси України*, 4, 45-48.

Рудько, Г.І., Курило, М.М., Бала, В.В. (2016). Співставлення критеріїв визначення та ознак класифікації запасів і ресурсів у вітчизняній та міжнародній практиці: геолого-економічної оцінки на прикладі родовищ вугілля. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1(72), 76-81.

Рудько, Г.І., Бала, В.В., Курило, М.М. (2017). Оцінка ризиків освоєння родовищ вугілля на прикладі вітчизняних об'єктів з незначними запасами. *Мінеральні ресурси України*, 3, 19-21.

Рудько, Г.І., Курило, М.М., Радованов, С.В. (2011). Геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин. Київ: АДЕФ-Україна.

Статистичний щорічник України за 2013 рік: [довідкове видання]. (2014). Державна служба статистики України; за ред. І.С.Вернера. Київ.

Статистичний щорічник України за 2017 рік: [довідкове видання]. (2018). Державна служба статистики України; за ред. І.С.Вернера. Київ.

Шевченко, А.В., Воробйов, С.Л. (н.д.). Пріоритети та важелі модернізації вугільної галузі в Україні. Аналітична записка. Отримано з <http://www.niss.gov.ua/articles/1495/>

References

Andriivskiy, I.D., Matiukha, V.V., Movchan, V.V. (2011). Modern state and prospects of development of extractive industry of Ukraine. *Mineral resources of Ukraine*, 3, 8-14. [in Ukrainian]

Bilan, T.R. (2017). Balance-optimization model of determination of volumes of the own mining and his importation taking into account influence of events on modernisation and reconstruction on техніко-економічні. *Problems of general energy*, 4(51), 18-22. [in Ukrainian]

Bobro, D.H. Coal industry of Ukraine is in the conditions of hybrid war. Analytical message: the National institute of strategic researches. Retrieved from <http://www.niss.gov.ua/articles/1890/>. [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]

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]

Informative certificate about the basic indexes of development of industries of fuel and energy complex of Ukraine after 12 months in 2015. (2016). Official web-site of Ministry of energy and coal industry of Ukraine. Retrieved from http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/archive?cat_id=35081&page=6. [in Ukrainian]

Informative certificate about the basic indexes of development of industries of fuel and energy complex of Ukraine after 12 months in 2016. (2017). Official web-site of Ministry of energy and coal industry of Ukraine. Retrieved from http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/archive?cat_id=35081&page=6. [in Ukrainian]

Informative certificate about the basic indexes of development of industries of fuel and energy complex of Ukraine after 12 months in 2017. (2018). Official web-site of Ministry of energy and coal industry of Ukraine. Retrieved from http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/archive?cat_id=35081&page=6. [in Ukrainian]

Informative certificate about the basic indexes of development of industries of fuel and energy complex of Ukraine after 12 months in 2018. (2019). Official web-site of Ministry of energy and coal industry of Ukraine. Retrieved from http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/archive?cat_id=35081&page=6. [in Ukrainian]

Honchar, M., Chubuk, A., Ishchuk, O. (n. d.). Hybrid war is in East Європи. Nonmilitary measuring. Power component. A center of globalistic "Strategy XXI". Retrieved from <http://geostrategy.org.ua>. [in Ukrainian]

V. Volkov, Dr. Sci. (Techn.), Prof.,
E-mail: volkovvp49@gmail.com;
L. Horoshkova, Dr. Sci. (Econ.), Prof.,
E-mail: goroshkova69@gmail.com;
Zaporizhzhya National University,
66 Zhukovskogo Str., Zaporizhzhya, 69600, Ukraine;
Y. Khlobystov, Dr. Sci. (Econ.), Prof.,
E-mail: ievgen.khlobystov@ukr.net;
National University of "Kyiv-Mohyla Academy",
2 Skovorody Str., Kyiv, 04655, Ukraine

Hoshovskiy, S.V., Krasnozhan, M.D., Liuta, N.H., Vasylenko, A.P., Kostenko, M.M. (2014). Raw Mineral-material base of Ukraine. Article 1. In relation to the necessity of making alteration to the National program of development of raw mineral-material base of Ukraine on a period 2030 to. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 4-7.

Korzhnev, M.M., Mykhailov, V.A., Mischenko, B.S. et al. (2006). Bases of economic geology: The manual for the students of geological specialties of higher educational institutions. K.: Logos. [in Ukrainian]

Krasnozhan, M.D. (2015). Raw Mineral-material base of Ukraine. Article 4. Fuel and energy resources and prospects of their increase. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 1-6. [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. (2017). Geology-economical estimation of minerals (pressing questions and methodical aspects). *Mineral resources of Ukraine*, 3, 22-26. [in Ukrainian]

Lysenko, O.A., Vasylenko, 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]

Prymushko, S.I., Biloshapskoi, T.D., Velychka, V.F. (2017). Mineral resources of Ukraine. K.: State scientific and production enterprise the "State informative geological fund of Ukraine". [in Ukrainian]

Nagorniy, Yu.M., Nagorniy, V.M., Prihodchenko, V.F. (2005). Geology of coal deposits. Dnipropetrovsk: НГУ.

Rudko, H.I., Kurylo, M.M., Radovanov, S.V. (2011). Geological and economic evaluation of mineral deposits. Kyiv: АДЕФ-Україна. Retrieved from <http://geoinf.kiev.ua/horyuchi-korysni-kopalyny/tverdi-horyuchi-korysni-kopalyny/> [in Ukrainian]

Rudko, H.I., Kurylo, M.M., Bala, V.V., Makovskiy, Yu.S. (2018). Methods of determination (ground) of cost of commodity products are at the геолого-економічній estimation of coal deposits. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 45-48. [in Ukrainian]

Rudko, H.I., Kurylo, M.M., Bala, V.V. (2016). Comparison of criteria of determination and signs of classification of supplies and resources is in home and international practice. Geological-economy estimation on the example of deposits of coal. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (72), 76-81. [in Ukrainian]

Rudko, H.I., Bala, V.V., Kurylo, M.M. (2017). An estimation of risks of mastering of deposits of coal is on the example of home objects with insignificant supplies. *Mineral resources of Ukraine*, 3, 19-21. [in Ukrainian]

Statistical annual of Ukraine for 2013: [certificate edition]. (2014). Government service of statistics of Ukraine. For red I.Ye.Verner. Kyiv. [in Ukrainian]

Statistical annual of Ukraine for 2017: [certificate edition]. (2018). Government service of statistics of Ukraine. For red I.Ye.Verner. Kyiv. [in Ukrainian]

Shevchenko, A.V., Vorobyov, S.L. (n. d.). Priorities and levers of modernisation of coal industry are in Ukraine. Analytical message. Retrieved from <http://www.niss.gov.ua/articles/1495/>. [in Ukrainian]

Volkov, V.P., Horoshkova, L.A. (2019). Management of sustainable mining of coal resources in Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 87. (et published). [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 16.09.19

DEVELOPMENT OF EXPORT AND IMPORT OPERATIONS IN THE COAL MINING INDUSTRY

As a result of the research, system approach to the management of mining, utilization, export and import of national coal resources has been formed.

The comparison of export and import prices for metallurgical coal and anthracite led us to the conclusion that export-import operations are ineffective, since export prices for anthracite are lower than import ones. It has been proved that it is unprofitable for the national economy to export coal at low prices in situations of coal mining reduction in Ukraine.

Analysis of black coal, anthracite (2701), coke and semi-coke, retort carbon (2704) export and import's geographic structure has been made. It has been found out that the Russian Federation and the USA are the main importers of black coal and anthracite, export flows were concentrated in Bulgaria, Turkey, Belgium and the Russian Federation.

It has been specified that coke, semi-coke and retort carbon (2704) during 2011-2018s were imported mainly from the Russian Federation, the USA and Poland. Export destination was the Russian Federation.

It has been proposed to use system approach to rational mining, use of the country's available mineral resources, taking into account export-import flows, external and internal markets pricing, as well as the resource component of national security.

Keywords: mineral and raw materials base, fuel and energy resources, hard coal, coking coal, anthracite, management.

В. Волков, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: volkovvp49@gmail.com;
Л. Горошкова, д-р экон. наук, проф.,
E-mail: goroshkova69@gmail.com;
Запорожский национальный университет,
ул. Жуковского, 66, г. Запорожье, 69600, Украина;
Е. Хлобыстов, д-р экон. наук, проф.,
E-mail: ievgen.khlobystov@ukr.net;
Национальный университет "Киево-Могилянская академия",
ул. Григория Сковороды, 2, г. Киев, 04655, Украина

РАЗВИТИЕ ЭКСПОРТНО-ИМПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ В УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ УКРАИНЫ

В результате проведенных исследований сформирован системный подход к управлению добычей, использованием, экспортом и импортом угольных ресурсов страны.

Сравнение экспортных и импортных цен на коксующийся уголь и антрацит позволило прийти к выводу о неэффективности экспортно-импортных операций, поскольку экспортные цены на антрацит ниже импортных. Доказано, что в ситуации снижения добычи угля в Украине экспорт по низким ценам вообще является убыточным для экономики страны.

Был проведен анализ географической структуры экспорта и импорта угля каменного, антрацита (2701), кокса и полукокса, угля ретортного (2704). Установлено, что основными импортерами угля каменного, антрацита являются Российская Федерация и США. Экспортные потоки были сосредоточены в такие страны, как Болгария, Турция, Бельгия и Российская Федерация.

Установлено, что кокс и полукокс, уголь ретортный (2704) на протяжении 2011–2018 гг. импортировался преимущественно из Российской Федерации, США и Польши. Экспортные потоки были направлены в Российскую Федерацию.

Предложено использование системного подхода к рациональной добыче, использованию минерально-сырьевой базы страны с одновременным учетом экспортно-импортных потоков и ценовой конъюнктуры внешнего и внутреннего рынков с учетом ресурсной составляющей безопасности государства.

Ключевые слова: минерально-сырьевая база, топливно-энергетические ресурсы, уголь каменный, уголь коксующийся, антрацит, управление.

UDC 622.24

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.11>

G. Efendiyev¹, Dr. Sci. (Techn.), Prof., Corr. Member of ANAS,
 E-mail: galib_2000@yahoo.com,
 M. Karazhanova², PhD (Techn.),
 E-mail: mikado_70@inbox.ru;
 D. Akhmetov², PhD student,
 E-mail: aldee@list.ru;
 I. Piriverdiyev¹, PhD student,
 E-mail: igorbaku@yandex.ru;
¹Institute of Oil and Gas Azerbaijan of National Academy of Sciences,
 9 F. Amirov Str., Baku, AZ1000, Azerbaijan;
²Yessenov University,
 32 microdistricts, Aktau, 130003, The Republic of Kazakhstan

EVALUATING THE DEGREE OF COMPLEXITY OF TIGHT OIL RECOVERY BASED ON THE CLASSIFICATION OF OILS

(Представлено іноземним членом редакційної колегії проф. Г. Кулієвим)

The article discusses the results of the use of cluster analysis in assessing the degree of oil recovery complexity and its impact on the performance indicator. For this purpose, clustering was performed using a fuzzy cluster analysis algorithm. It should be noted that along with the deposits of heavy and highly viscous oils, a large share of hard-to-recover reserves is also confined to conditions with very low reservoir permeability values. Data on viscosity, oil density and oil permeability of in-situ conditions from various fields of Kazakhstan are collected. Using the results of this classification, a statistical analysis of indicators of various types of hard-to-recover oils was performed. In the process of analysis, a generalized characteristic was determined for each class of oil, including viscosity, oil density and reservoir permeability. The generic characteristic is a linear transformation of the three characteristics. The results were subjected to statistical processing. At the same time, an attempt was made to establish and analyze the relationship between the degree of recovery complexity of hard-to-recover oils and oil recovery coefficient. In the course of the analysis, the average values of the oil recovery coefficient and the index of the degree of recovery complexity of hard-to-recover oil within each cluster were calculated and the relationship between them was plotted. The observed dependence, built on averaged points, is close to a power law, and, as one would expect, with an increase in the degree of oil recovery complexity, the oil recovery coefficient falls. The obtained estimates of the degree of oil recovery complexity allow us to rank different types of oils by their viscosity, density and reservoir permeability, which can be used to compare types of hard-to-recover oils by the value of the quality indicator. Methods to solve the problem of hard-to-remove high-viscosity and heavy oils should be aimed at reducing the viscosity of oil in the reservoir: injection of hot water / steam into the reservoir, the use of electric heaters, etc.

Purpose. Assessment of the degree of oil recovery complexity and its impact on the efficiency of field development.

The technique. The solution of the tasks set in the work was carried out on the method of mathematical statistics and the theory of fuzzy sets. In this case, the methods of processing the results, the correlation analysis, and the algorithm of fuzzy cluster analysis were used.

Results. As a result of studies, 4 classes were obtained, each of which characterizes the degree of oil recovery complexity, a parameter was proposed for quantifying the degree of complexity, including oil density and viscosity, reservoir permeability, a relationship between this parameter and oil recovery coefficient was obtained.

Scientific novelty. A classification of hard-to-recover reserves based on a fuzzy cluster analysis has been performed, and a parameter has been proposed for quantifying the degree of oil recovery complexity, a relationship has been obtained that allows judging the oil recovery by the degree of oil recovery complexity.

Practical significance. The results obtained make it possible to classify hard-to-recover reserves and make decisions on the choice of methods for influencing the reservoir in various geological conditions.

Keywords: density, viscosity, permeability, fuzzy cluster, hard-to-recover reserves, degree of recovery complexity, oil recovery.

Introduction. The oil industry has now reached a stage when oil fields are being developed under increasingly unfavorable conditions due to reserves deterioration and a greater share of hard-to-recover (HTR) reserves. Large number of prolific pools and fields are mature and plagued by declining oil production and increasing water cut as well as unfavorable qualitative characteristics of crude oil reserves in pools that are once again brought on stream (Антониади и Савенок, 2013; Нвизуг-Бу и Савенок, 2015; Яценко и Полищук, 2016).

In order to give a clear and exhaustive definition of what HTR reserves actually are, we need to analyze undeveloped oil reserves and understand the reasons why they do not contribute much to oil production. Among these reasons are physical and chemical oil properties, description of settings in which oil occurs and so on. In other words, the term 'HTR reserves' becomes applicable when there is a discrepancy between available technological solutions and geological aspects of crude oil occurrence as well as oil properties.

Thus, hard-to-recover reserves are reserves concealed in pools (fields, development units) whose geological settings of oil occurrence and (or) physical oil properties are relatively uncondusive to oil recovery and whose development with existing technologies under the current tax system is regarded as economically non-viable. The term 'hard-to-recover reserves' has been applied very

loosely because reserves can vary in the complexity of their recovery. There is, therefore, a need to classify them and evaluate the degree of recovery complexity. There is a wide variety of object classifying techniques to select from. Before applying a certain technique, we need to substantiate our choice of classification criteria. Numerous studies are consistent with factors that are responsible for the complexity of oil recovery, i.e. indicators that determine oil properties and settings in which oil occurs.

We also examined the results of HTR reserves classification and revealed a need for dividing the whole set into homogeneous groups according to a combination of classification criteria. A cluster analysis is best suited for this task (Efendiyev et al., 2018). In order to substantiate the technique of choice this paper discusses the core concept of the cluster analysis and the results of its application, and evaluates the degree of oil recovery complexity and its effect on performance.

The results are produced by applying clustering techniques in examining geotechnical data. Over the recent years, the issues of cluster analysis (sometimes also known as the issues of automated classification) have been used extensively in such spheres as economics, sociology, medicine, geology, oilfield development and other industries, where we deal with sets of objects of arbitrary nature described as $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ vectors that have to

be automatically divided into groups of homogeneous objects according to the criteria of similarities (within a homogeneous object or a cluster) and differences between these objects. Much has been published on psychological, sociological, economic, G&G, well drilling, oil and gas field development studies (Akhmetov et al., 2018; Koilybayev et al., 2018; Зайченко и Гончар, 2007).

As previously noted in different publications, there are more than a hundred of different clustering algorithms, e.g. hierarchical and non-hierarchical cluster analyses and fuzzy clustering.

In recent years, these techniques have been widely applied for collecting and processing data and mining intellectual knowledge from data. Conventional cluster analysis techniques are based on a clear-cut partition of an initial set into several subsets. Each point (recognizable object) belongs to one cluster only, i.e. the characteristic function (the equivalent of a membership function in conventional sets) amounts to one for this cluster and to zero for the other clusters. If a point does not belong to any cluster, then a new cluster is created. However, such a restriction is not always true. More often than not partition must be done in such a way as to determine the degree to which each object belongs to each set. In this case, it makes sense to use fuzzy methods of cluster analysis. Fuzzy cluster analysis in particular and cluster analysis in general (also known as automated classification) have been extensively used over the last years in economics, sociology, medicine, geology, oil field development and other industries, where we deal with sets of objects of arbitrary nature described as $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ vectors that have to be automatically broken down into groups of objects that are homogeneous in regards to specific criteria. Recent years have seen these techniques being widely applied for the purpose of data acquisition and analysis. As mentioned above, conventional cluster analysis techniques are based on a clear-cut partition of an initial set into subsets, and each point can only be assigned to one cluster. Roughly speaking, clustering means dividing a set of input indicators (vectors) into groups or clusters that are homogeneous in terms of the degree of their 'similarity' and heterogeneous in relation to each other. In other words, each cluster represents a group that contains homogeneous data (selected according to certain clustering criteria), but separate clusters (groups) are heterogeneous with respect to each other.

Thus, a cluster can be defined as a group of elements that share common properties and similar values of classification criteria.

The following two indicators can be regarded as a cluster's characteristics:

- internal homogeneity;
- external isolation, i.e. heterogeneity in relation to other such clusters.

The method elaborated in (Efendiyev et al., 2018) is based on a fuzzy cluster analysis and allows predicting lost circulation of any scale at an early stage of drilling operations. A total of five classes were differentiated in the course of this study, with each class defining the severity of lost circulation expressed as linguistic variables. This provided a basis for building fuzzy models that represent a relationship between the estimates of petrophysical properties and the volume of lost drilling mud. The results obtained facilitate decision-making regarding lost circulation prevention and a timely response to eliminate its consequences. In most cases, specifically when it comes to oilfield practices (Efendiyev et al., 2018; Akhmetov et al., 2018; Koilybayev et al., 2018; Зайченко и Гончар, 2007; Bezdek et al., 1984), a partition must be done in such a way as to determine the degree to which each object belongs to, i.e. the degree of recognition. In this case, it makes sense to

opt for fuzzy cluster analysis methods. The application of the K-means technique in classifying seismic data is discussed in (Zhang, 2015). The essence of the problem was as follows. The available seismic data were to be divided into different classes or clusters and analyzed in such a way as to ensure that further production costs will be decreased, new oil-saturated beds will be discovered and the decisions already taken will be scientifically grounded. It is emphasized that the K-means algorithm is suitable for clustering massive datasets and has been used for clustering data collected during exploration. However, the authors note that in this case it is necessary to identify the k-means algorithm for the purpose of seismic data clustering. This work is aimed at improving the conventional K-means algorithm and establishing whether it can be successful in examining legacy geological data. It has been proven that by improving the K-means algorithm we can enhance efficiency and feasibility. The article provides an overview of the core theory behind the data mining techniques and discusses the key principles and algorithms of cluster analysis. Seismic data interpretation using cluster analysis techniques is discussed in an article (Sabet and Javaherian, 2009), which says that we can extract more information about the structures and geology of subsurface blocks by clustering seismic data. The paper singles out the efficient K-means clustering algorithm as the clustering technique of choice for classifying seismic facies based on seismic data. By giving the k value (i.e. the number of clusters), the k-means clustering algorithm uses an iterative algorithm that minimizes the sum of distances from each sample to its cluster centroid over all clusters. This algorithm moves samples between clusters until the sum cannot be decreased any further. The results is a set of clusters that are as compact and well separated as possible. The authors note that by applying the K-means clustering algorithm to a real dataset it was shown that more seismic facies appear by increasing the k value and this provides useful information about subsurface deposits.

In (Долінський, 2017), the results of the use of cluster analysis in the classification of geological objects are presented. The methods of spatial clustering, as noted in the work, and the spatial classification (selection of objects with given characteristics in the geological body) are performed by the components of the expert system when predicting areas that are promising for oil and gas. The results of the implementation of the algorithms created for this purpose were tested on the data obtained in the course of drilling and seismic exploration within the Sribnen depression located in the zone of the Central Section of the Dnieper-Donetsk depression. Examples of maps obtained from the results of these calculations are presented, which demonstrate the mutual arrangement of the clusters obtained.

For the purpose of classifying HTR reserves we ran clustering using a fuzzy cluster algorithm and gathered data on oil viscosity, oil density and oil permeability in-situ conditions for the following Kazakhstan's fields: Karazhanbas, Kalamkas, Tasbulat, Komsomolskoye, Turkmenoi, Aktas, Dolinnoye, Shinzhir, Zhylankabak, Matin, Severnoye Priozernoye, Tabynai, Arystanovskoye, Kamenistoye, Zholdybai, Airankol', Botakhan, Zapadnaya Prorva, Dosmukhambetovskoye, Zaburunye, Vostochny Makat, Yuzhnoye Karatobe, Severnye Buzachi, Zhetibai, and Dunga. The following three indicators were selected for our cluster analysis: oil viscosity, oil density, and reservoir permeability. The fuzzy cluster analysis produced in total four classes, with each class reflecting the degree of oil recovery complexity (Akhmetov et al., 2018):

- the formation is permeable, while the oil is highly viscous and extra heavy;

- the formation is moderately permeable, while the oil is viscous and heavy;
- the formation is highly permeable, while the oil is of moderate viscosity and density;

- the formation is poorly permeable, while the oil is light and has low viscosity.

The results produced by the cluster analysis are presented in Table 1.

Table 1

The results from fuzzy cluster analysis using data from Kazakhstan's fields with HTR reserves

PERM, mD	μ , MPa·s	ρ , g/cm ³	η	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
531	835	0,929	0,062419	0,9179	0,0339	0,0304	0,0178
166	378	0,928	0,11044	0,8965	0,0726	0,0175	0,0134
...	...	...	...	...	...	...	...
517	449	0,93	0,246132	0,9991	0,0005	0,0003	0,0001
567	500	0,933	0,047994	0,9997	0,0002	0,0001	0
54,3	1,6	0,792	0,486552	0,0025	0,5481	0,0043	0,4451
133	1,33	0,797	0,025344	0,002	0,7663	0,0038	0,228
...	...	...	...	...	...	...	...
302	7,115	0,829	0,308	0	0,9994	0,0001	0,0005
404	11,54	0,855	0,241	0,0001	0,9993	0,0003	0,0004
363	6,45	0,835	0,296	0	0,9996	0,0001	0,0003
299	8,74	0,831	0,510654	0	0,9996	0,0001	0,0003
2186	491	0,927	0,148263	0,4282	0,0739	0,4636	0,0343
2088	25,03	0,799	0,241	0,0275	0,0398	0,9094	0,0233
...	...	...	...	...	...	...	...
1232	54	0,877	0,171497	0,0003	0,001	0,9985	0,0002
1273	21,4	0,891	0,18184	0,0005	0,0015	0,9977	0,0002
81	2,08	0,73	0,102669	0	0	0	1
11	3,8	0,722	0,183775	0	0	0	1
...	...	...	...	...	...	...	...
127	3,3	0,776	0,102243	0,0015	0,2063	0,0029	0,7893
10	6,55	0,783	0,51087	0,0022	0,2804	0,0035	0,714
82,37	2,4	0,785	0,010098	0,0021	0,3894	0,0039	0,6046

Note. PERM is permeability of the formation, μ is dynamic viscosity, ρ is oil density, η is the oil recovery factor, and μ_i is a function defining the degree of membership to the i -th cluster.

The work (Akhmetov et al., 2018) gives a graphical representation of boundaries separating classes-terms- sets of oil density, oil viscosity and reservoir permeability. In this case, light oil has density of 700–815 kg/m³, moderately heavy oil has density of 800–890 kg/m³; heavy oil has density of 892–910 kg/m³; and extra heavy oil has density ranging between 910 and 933 kg/m³ and low viscous is (0,17–6,9) MPa·s; moderately viscous – (8,6–55) mPa·s; viscous – (55–160) MPa·s; 160 MPa·s and higher. Concerning permeability they are highly permeable (840–2180) mD; permeable (480–800) mD; moderately permeable (130–690) mD; poorly permeable (less than 130) mD. The results produced by the c-means clustering algorithm helped differentiate HTR reserves according to the degree of complexity of their recovery. This algorithm was proposed by an Australian scientist James Bezdek in 1981. Each class is characterized by its own degree, category of recovery complexity. Once these results are available, we can now perform recognition of a certain oil with known properties and geological setting by assigning it to one class or another. Elements within a certain cluster must be close to each other, while individual clusters must be as far apart as possible. Figure 1 gives a 3D representation of how the specified classes are positioned in relation to each other. The axes shown in the figure represent in-situ oil permeability, oil viscosity and density. Identical points indicate the membership of the oil with certain geological setting and properties (expressed by its coordinates) in a homogeneous cluster.

It should be noted that a greater tight oil output observed in the last few years has led to a variety of problems associated with its production. Developing HTR oil reserves such as highly viscous and heavy oil rich in sulfur, resins, heavy metals etc. considerably deteriorates the quality of oil reservoir resulting in a greater adverse effect on the environment (Яценко и Полищук, 2016).

Statistical analysis and evaluating the degree of oil recovery complexity. Recent years have seen an increase in the amount of tight oil refinement. The degree of their recovery is subject not only to anomalous properties of crude oil but also to intricate geological setting in which such oil occurs. These factors dictate the need for an analysis that will produce generalized quantifiable values that define the complexity of tight oil recovery. Aspects of physical and chemical properties and geological setting in which HTR oil occurs are discussed in (Яценко и Полищук, 2016; Максимова и др., 2005; Муслимов, 2016; Лисовский и Халимов, 2009). However, generalized quantifiable values interrelated with fields' production performance has received insufficient study, which hinders the solution of oil production problems in general. In light of this, we examined performance indicators of different types of HTR oils found in Kazakhstan by using the results of their classification discussed above.

The analysis involved determining a generalized characteristic for each differentiated class of oils (Table 1). This characteristic included oil viscosity, oil density and in-situ permeability. The generalized characteristic represents a linear transformation of the three factors. The generalized characteristic was initially expressed as:

$$\ln K = \alpha_1 \ln 10v + \alpha_2 \rho - \alpha_3 \ln K_{perm} \quad (1)$$

It follows that

$$K = \frac{(10v)^{\alpha_1} X^{\alpha_2}}{K_{perm}^{\alpha_3}} \quad (2)$$

Here $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ are parameters that honour a weight contribution of each examined indicator. Their values are computed using the following expressions:

$$\alpha_1 = \frac{\sum \ln 10v}{\sum \ln 10v + \sum \rho + \sum \ln K_{perm}} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{\sum \rho}{\sum \ln 10v + \sum \rho + \sum \ln K_{perm}} \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \frac{\sum \ln K_{perm}}{\sum \ln 10v + \sum \rho + \sum \ln K_{perm}} \quad (5)$$

K_{perm} is in-situ permeability, v , ρ is oil viscosity and density, respectively, $X = e^\rho$.

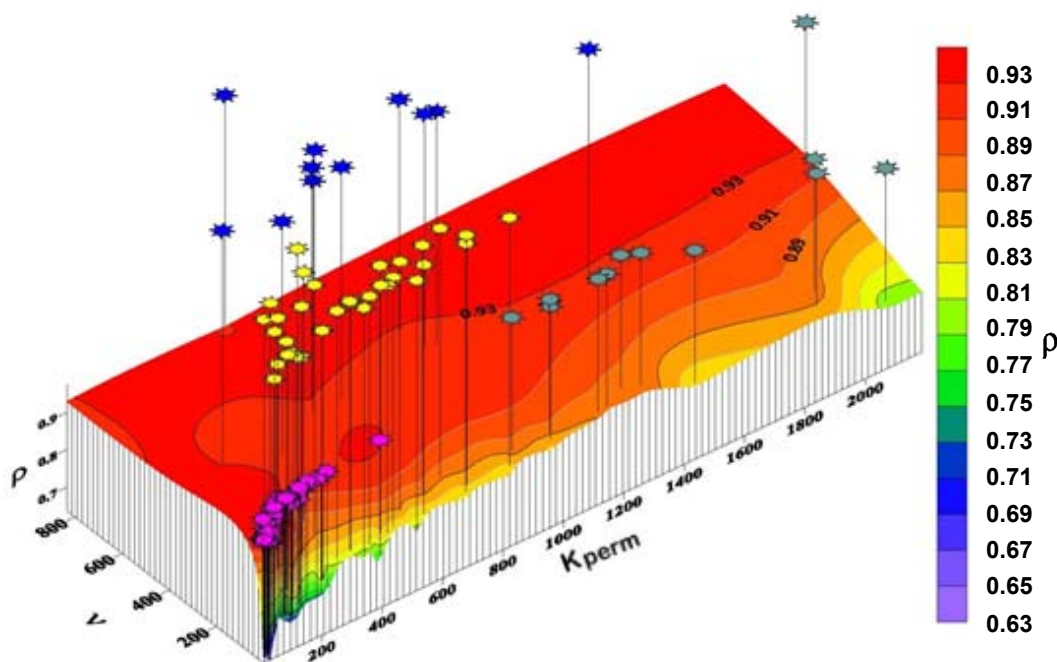


Fig. 1. The position of clusters (defining the degree of oil recovery complexity) in the 3D space

The results were subjected to statistical processing and an attempt was made to establish a relationship between the degree of complexity of tight oil recovery (K) and the oil recovery factor. The analysis involved computing average oil recovery factor values and the estimated degree of tight

oil production complexity inside each cluster and generating a relationship between them.

Fig. 2 shows a relationship between oil recovery factor and description of the degree of oil recovery complexity.

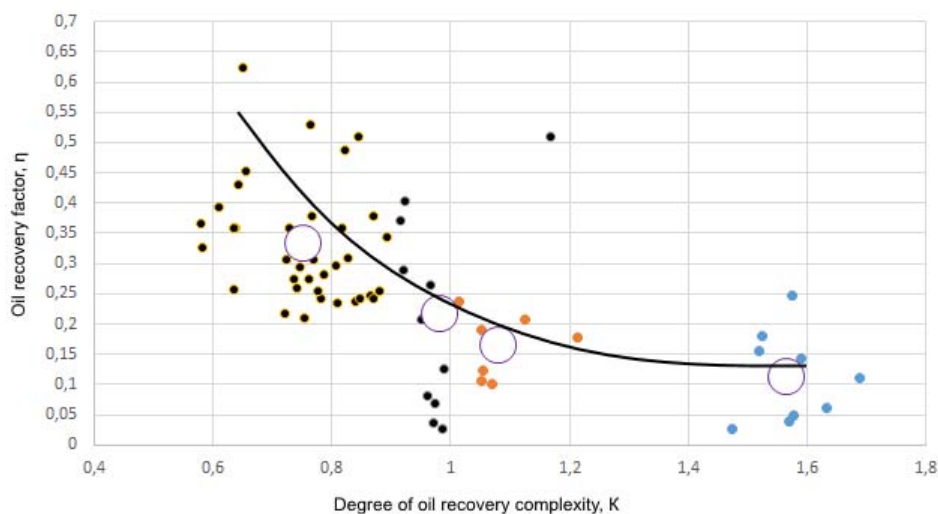


Fig. 2. A relationship between oil recovery factor and description of the degree of oil recovery complexity

The largest signs indicate the points that characterize average values for analogous signs. As seen in Fig. 2, the established relationship constructed on averaged points shows a good match with the power-law relation. As the degree of oil recovery complexity rises, the oil recovery factor unsurprisingly decreases. The observed dependence was built according to the mean values of the studied variables for each cluster. Analytically, this relationship is as follows:

$$\eta = 0,1729K^{-1.05} \quad (6)$$

The analysis of this dependence showed that it can be traced quite clearly at the middle points, and the analysis of the correlation coefficients of individual linear sections showed that, with the exception of the first cluster, the links within the other clusters are very weak, and at the same time this approach, complementing the results of clustering, makes it possible to specify the boundaries of homogeneous groups

(clusters). Such an approach based on the analysis of the values of the correlation coefficient using the example of the relationship between acoustic impedance and clay content in relation to the differentiation of clay rocks by the porosity was proposed in (Бухаєва *et al.*, 2018). The results of applying this approach allow to expand the possibility of statistical methods in solving geological and technological problems.

Conclusion. The following problems arise in developing tight oil reserves: low mobility of oil in reservoir, problems associated with bringing crude oil to the surface and its further transportation due to high oil viscosity and density, which in turn requires heavy expenditure on specialized costly technology and equipment.

By examining the methods and principles of the HTR reserves classifications proposed, we have scientifically substantiated the key concepts underlying the generation and

practical application of an approach to classifying oil, oil-and-gas, and gas fields according to a set of indicators. This technique enables us to evaluate the degree of oil recovery complexity.

The presented classification of fields with HTR reserves is based on examining and summarizing information about a combination of indicators characterizing the subsurface within several Kazakhstan's fields using a fuzzy cluster analysis algorithm.

The results of this classification have shown that a large share of HTR reserves is confined not only to heavy and high-viscosity oil fields, but also to reservoirs with very low permeability, that is why permeability was included among the classification indicators.

Qualitative aspects of tight oil varying in viscosity, density and occurrence were examined with the proposed criterion of oil quality (tentatively referred to as the degree of oil recovery complexity). We have found a reciprocal relationship between this criterion and the results of tight oil classification, according to which different oils were divided into four classes of quality. We constructed a crossplot between the oil recovery factor and the distinguished characteristics.

The obtained estimates of the degree of oil recovery complexity enable us to rank different types of oil by their viscosity, density and in-situ permeability. This could be useful in comparing the types of tight oils according to the magnitude of the quality indicator.

The approaches to tackling tight high-viscosity and heavy oil issues should be aimed at decreasing oil viscosity in the formation by injecting hot water/steam into the formation, applying electric heaters and so on.

Moreover, it is common knowledge that at a mature stage of field development wells tend to have low production rates and high water cut. Some of these low-yield wells with high water cut are loss-making while some economic producing wells are often idle waiting for well servicing, which in general adversely affects the company's efficiency. In view of the above mentioned, we can conclude that there is a need for a thorough analysis of fields' historical performance and an assessment of well stock efficiency so that we can make the most informed and grounded decisions in future.

Список використаних джерел

- Антониади, Д.Г., Савенок О.В. (2013). Анализ структуры трудноизвлекаемых запасов и тенденций увеличения темпа прироста. *Геотехнический журнал*, 18, 2, 76–80.
- Вижва, С., Соловйов, І., Круглик, В., Лісний, Г. (2018). Прогнозування зон підвищеної пористості у глинистих породах сходу України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 80, 1, 33–39.
- Долінський, І. (2017). Геоінформаційний експертно-моделюючий комплекс дослідження регіональних моделей в геології. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 79, 4, 86–91.
- Зайченко, Ю.П., Гончар, М.А. (2007). Нечеткие методы кластерного анализа в задачах автоматической классификации в экономике. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Сер.: Інформатика, управління та обчислювальна техніка*, 47, 198–206. Отримано з http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkpi_iuot_2007_47_22
- Лисовский, Н.Н. Халимов, Э.М. (2009). О классификации трудноизвлекаемых запасов. *Вестник ЦКР Роснедра*, 6, 33–35.
- Максотов, Р., Орлов, Г., Осипов, А. (2005). Освоение запасов высоковязких нефтей в России. *Технологии ТЭК*, 6, 36–40.
- Муслимов, Р. Х. (2016). Новая классификация запасов и ресурсов нефти и горючих газов – движение вперед или вспять? *Георесурсы*, 18, 2, 80–87. Отримано з <https://cyberleninka.ru/article/n/novaya-klassifikatsiya-zapasov-i-resursov-nefti-i-goryuchih-gazov-dvizhenie-vpered-ili-vspyat>
- Нвизуг-Би, Л.К., Савенок, О.В. (2015). Трудноизвлекаемые запасы углеводородов, важные ресурсы на территории Федеративной Республики. Материалы XXI Международной научно-практической конференции, современное состояние естественных и технических наук, Россия, Москва, декабрь 2015, 41–46. Отримано з <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-znachimost-razrabotki-osvoeniya-i-dobychi-bituma-iz-bituminoznogo-peska-i-tyazhelyo-nefti-v-nigerii>
- Яценко, И.Г., Полищук Ю.М. (2016). Трудноизвлекаемые нефти и анализ их свойств на основе классификации по качеству нефти. *Вестник*

Российской Академии естественных наук (Западно-Сибирское отделение), 19, 37–44.

Akhmetov, D.A., Efendiyev, G.M., Karazhanova, M.K., Koylibayev, B.N. (2018). Classification of Hard-to-recover Hydrocarbon Reserves of Kazakhstan with the Use of Fuzzy Cluster-analysis. *13th International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing, ICAFS 2018, 27-28 August 2018, Warsaw, Poland*, 865–872.

Bezdek, J.C., Ehrlich, R., Full, W. (1984). FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. *Computers & Geosciences*, 10, 2–3, 191–203.

Efendiyev, G.M., Mammadov, P.Z., Piriverdiyev I.A., Mammadov, V.N. (2018). Estimation of the lost circulation rate using fuzzy clustering of geological objects by petrophysical properties. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 81, 2, 28–33.

Koilybayev, B.N., Strekov, A.S., Bissebayeva, K.T., Mammadov, P.Z., Akhmetov, D.A., Kirisenko, O.G. (2018). Decision-making on restriction of water inflows into oil wells in dependence on the type of initial information. *13th International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing, ICAFS 2018, 27-28 August 2018, Warsaw, Poland*, 859–864.

Sabeti, H., Javaherian, A. (2009). Seismic Facies Analysis Based on K-means Clustering Algorithm Using 3D Seismic Attributes. *Shiraz 2009 – First International Petroleum Conference & Exhibition, 4-6 May 2009, Iran, Shiraz*. Отримано з https://www.researchgate.net/publication/286973601_Seismic_Facies_Analysis_Based_on_K-means_Clustering_Algorithm_Using_3D_Seismic_Attributes

Zhang, L. (2015). Improvement of K-means algorithm and its applications in analysis of geological exploration seismic data. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20, 12, 4423–4434.

References

Akhmetov, D.A., Efendiyev, G.M., Karazhanova, M.K., Koylibayev, B.N. (2018). Classification of Hard-to-recover Hydrocarbon Reserves of Kazakhstan with the Use of Fuzzy Cluster-analysis. *13th International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing, ICAFS 2018, 27-28 August 2018, Warsaw, Poland*, 865–872.

Antoniadi, D.G., Savenyuk O.V. (2013). Analysis of the structure of hard-to-recover reserves and growth trends. *GeoEngineering*, 18, 2, 76–80. [in Russian]

Bezdek, J.C., Ehrlich, R., Full, W. (1984). FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. *Computers & Geosciences*, 10, 2–3, 191–203.

Dolynskiy, I. (2017). Geoinformation expert-modeling complex of research of regional models in geology. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 79, 4, 86–91. [in Ukrainian]

Efendiyev, G.M., Mammadov, P.Z., Piriverdiyev I.A., Mammadov, V.N. (2018). Estimation of the lost circulation rate using fuzzy clustering of geological objects by petrophysical properties. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 81, 2, 28–33.

Koilybayev, B.N., Strekov, A.S., Bissebayeva, K.T., Mammadov, P.Z., Akhmetov, D.A., Kirisenko, O.G. (2018). Decision-making on restriction of water inflows into oil wells in dependence on the type of initial information. *13th International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing, ICAFS 2018, 27-28 August 2018, Warsaw, Poland*, 859–864.

Lisovsky, N.N., Khalimov, E.M. (2009). On the classification of hard-to-recover reserves. *Bulletin of TsKR Rosnedra*, 6, 33–35. [in Russian]

Maksutov, R., Orlov, G., Osipov, A. (2005). The development of high-viscosity oil reserves in Russia. *Energy Technologies*, 6, 36–40. [in Russian]

Muslimov, R.H. (2016). New classification of reserves and resources of oil and combustible gases – moving forward or backwards? *Georesources*, 18, 2, 80–87. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/novaya-klassifikatsiya-zapasov-i-resursov-nefti-i-goryuchih-gazov-dvizhenie-vpered-ili-vspyat> [in Russian]

Nvizug-Bi, L.K., Savenok, O.V. (2015). Hard-to-recover hydrocarbon reserves, important resources in the territory of the Federal Republic of Nigeria. *Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference, current state of natural and technical sciences*, 41–46. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-znachimost-razrabotki-osvoeniya-i-dobychi-bituma-iz-bituminoznogo-peska-i-tyazhelyo-nefti-v-nigerii> [in Russian]

Sabeti, H., Javaherian, A. (2009). Seismic Facies Analysis Based on K-means Clustering Algorithm Using 3D Seismic Attributes. *Shiraz 2009 - First International Petroleum Conference & Exhibition, 4-6 May 2009, Iran, Shiraz*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/286973601_Seismic_Facies_Analysis_Based_on_K-means_Clustering_Algorithm_Using_3D_Seismic_Attributes

Vyzhva, S., Solovyov, I., Kruhlyk, V., Lisny, G. (2018). Prediction of high porosity zones in clay rocks at the eastern Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80, 1, 33–39. [in Ukrainian]

Yashchenko, I.G., Polishchuk, Yu.M. (2016). Hard-to-recover oils and analysis of their properties based on classification by oil quality. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences (West-Siberian Branch)*, 19, 37–44. [in Russian]

Zaichenko, Yu.P., Gonchar, M.A. (2007). Fuzzy cluster analysis methods in problems of automatic classification in the economy. *News of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Ser.: Informatics, control and obscuration technology*, 47, 198–206. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkpi_iuot_2007_47_22

Zhang, L. (2015). Improvement of K-means algorithm and its applications in analysis of geological exploration seismic data. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20, 12, 4423–4434.

Г. Ефендиев¹, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНА,

E-mail: galib_2000@yahoo.com;

М. Каражанова², канд. техн. наук,

E-mail: mikado_70@inbox.ru;

Д. Ахметов², докторант,

E-mail: aldee@list.ru;

И. Пиривердиев¹, докторант,

E-mail: igorbaku@yandex.ru;

¹Институт нефти и газа Национальной Академии Наук Азербайджана,

вул. Ф. Амирова, 9, м. Баку, AZ1000, Азербайджан;

²Каспийский государственный университет технологий та инженерингу им. Ш. Есенова,

32 микрорайон, м. Актау, 130003, Республика Казахстан

ОЦІНКА СТУПЕНЯ СКЛАДНОСТІ ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКОВИДОБУВНИХ НАФТ НА ОСНОВІ ЇХНЬОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ

Розглянуто результати застосування кластерного аналізу при оцінці ступеня складності вилучення запасів нафти та його впливу на показник ефективності. З цією метою виконано кластеризацію із застосуванням алгоритму нечіткого кластер-аналізу. Слід зазначити, що поряд з родовищами важких і високов'язких нафт велика частка важковидобувних запасів приурочена також і до умов з дуже низькими значеннями проникності колекторів. Зібрані дані про в'язкість, густини нафти і проникність порід в умовах залягання нафт з різних родовищ Казахстану. За результатами даної класифікації проведено статистичний аналіз показників різних типів важковидобувних нафт. У процесі аналізу для кожного виділеного класу нафт визначалася узагальнена характеристика, що включає в'язкість, щільність нафти і проникність колекторів в умовах залягання. Узагальнена характеристика являє собою лінійне перетворення зазначених трьох характеристик. Результати були статистично оброблені. При цьому автори спробували встановити і проаналізувати взаємозв'язок між ступенем складності видобутку важковидобувних нафт і коефіцієнтом нафтовіддачі. У процесі аналізу розраховувалися середні значення коефіцієнта нафтовіддачі і показника ступеня складності видобутку важковидобувних нафт усередині кожного кластера і встановлювалася залежність між ними. Зазначена залежність, побудована по осереднених точках, близька до ступеневий, причому, як і слід було очікувати, зі збільшенням ступеня складності видобування нафти коефіцієнт нафтовіддачі падає. Отримані оцінки ступеня складності видобування нафти дозволяють ранжувати різні типи нафт за їхньою в'язкістю, щільністю і проникністю порід в умовах залягання, що можна використовувати для порівняння типів важковидобувних нафт за величиною показника якості. Методи розв'язання проблеми, пов'язаної з важковидобувними високов'язкими і важкими нафтами, повинні бути спрямовані на зниження в'язкості нафти у пласті: закачування гарячої води/пари у пласт, застосування електричних обігрівачів та ін.

Мета. Оцінка ступеня складності вилучення запасів і його впливу на ефективність розробки родовищ.

Методика. Рішення поставлених у роботі завдань здійснювалося методами математичної статистики і теорії нечітких множин. При цьому були використані: методика обробки результатів, кореляційний аналіз, а також алгоритм нечіткого кластер-аналізу.

Результати. У результаті досліджень отримано чотири класи запасів, кожен з яких характеризує ступінь складності вилучення запасів; запропоновано параметр для кількісної оцінки ступеня складності, що включає щільність і в'язкість нафти, проникність колекторів в умовах залягання; отримано залежність між цим параметром і коефіцієнтом нафтовіддачі.

Наукова новизна. Виконано класифікацію важковидобувних запасів, засновану на нечіткому кластер-аналізі, запропоновано параметр для кількісної оцінки ступеня складності вилучення запасів; отримано залежність, що дозволяє оцінювати нафтовіддачу пласта за ступенем складності вилучення запасів.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють провести класифікацію важковидобувних запасів і приймати рішення щодо вибору методів впливу на пласт у різних геологічних умовах.

Ключові слова: щільність, в'язкість, проникність, нечіткий кластер, важковидобувні запаси, ступінь складності вилучення, нафтовіддача.

Г. Эфендиев¹, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНА,

E-mail: galib_2000@yahoo.com;

М. Каражанова² К., канд. техн. наук,

E-mail: mikado_70@inbox.ru;

Д. Ахметов², докторант,

E-mail: aldee@list.ru;

И. Пиривердиев¹, докторант,

E-mail: igorbaku@yandex.ru;

¹Институт нефти и газа Национальной Академии Наук Азербайджана,

ул. Ф. Амирова, г. Баку, 9AZ1000, Азербайджан;

²Каспийский Государственный Университет технологий и инженеринга им. Ш. Есенова,

32 микрорайон, г. Актау, 130003, Республика Казахстан

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СЛОЖНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ НЕФТЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ КЛАССИФИКАЦИИ

Рассмотрены результаты применения кластерного анализа при оценке степени трудности извлечения запасов нефти и ее влияния на показатель эффективности. С этой целью выполнена кластеризация с применением алгоритма нечеткого кластер-анализа. Следует отметить, что наряду с месторождениями тяжелых и высоковязких нефтей, большая доля трудноизвлекаемых запасов приурочена также и к условиям с очень низкими значениями проницаемости коллекторов. Собранные данные о вязкости, плотности нефти и проницаемости пород в условиях залегания нефтей из различных месторождений Казахстана. На основе результатов данной классификации проведен статистический анализ показателей различных типов трудноизвлекаемых нефтей. В процессе анализа для каждого выделенного класса нефтей определялась обобщенная характеристика, включающая вязкость, плотность нефти и проницаемость коллекторов в условиях залегания. Обобщенная характеристика представляет собой линейное преобразование отмеченных трех характеристик. Результаты были статистически обработаны. При этом авторами сделана попытка установления и анализа взаимосвязи между степенью сложности добычи трудноизвлекаемых нефтей и коэффициентом нефтеотдачи. В процессе анализа рассчитывались средние значения коэффициента нефтеотдачи и показателя степени сложности добычи трудноизвлекаемой нефти внутри каждого кластера и строилась зависимость между ними. Данная зависимость, построенная по усредненным точкам, близка к степенной, причем, как и следовало ожидать, с увеличением степени сложности извлечения нефти коэффициент нефтеотдачи падает. Полученные оценки степени сложности извлечения нефти позволяют ранжировать разные типы нефтей по их вязкости, плотности и проницаемости пород в условиях залегания, что можно использовать для сравнения типов трудноизвлекаемых нефтей по величине показателя качества. Методы решения проблемы, связанной с трудноизвлекаемыми высоковязкими и тяжелыми нефтями, должны быть направлены на снижение вязкости нефти в пласте: закачка горячей воды/пара в пласт, применение электрических обогревателей и др.

Цель. Оценка степени сложности извлечения запасов и ее влияния на эффективность разработки месторождений.

Методика. Решение поставленных в работе задач осуществлялось при помощи методов математической статистики и теории нечетких множеств. При этом были использованы: методика обработки результатов, корреляционный анализ, а также алгоритм нечеткого кластер-анализа.

Результаты. В результате исследований получены четыре класса запасов, каждый из которых характеризует степень сложности извлечения запасов; предложен параметр для количественной оценки степени сложности, включающий плотность и вязкость нефти, проницаемость коллекторов в условиях залегания, получена зависимость между этим параметром и коэффициентом нефтеотдачи.

Научная новизна. Выполнена классификация трудноизвлекаемых запасов, основанная на нечетком кластер-анализе, и предложен параметр для количественной оценки степени сложности извлечения запасов; получена зависимость, позволяющая судить о нефтеотдаче пласта по степени сложности извлечения запасов.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют провести классификацию трудноизвлекаемых запасов и принимать решения по выбору методов воздействия на пласт в различных геологических условиях.

Ключевые слова: плотность, вязкость, проницаемость, нечеткий кластер, трудноизвлекаемые запасы, степень сложности извлечения, нефтеотдача.

UDC 553.982.22:553.981.2:551.87

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.12>

G. Gahramanov, Cand. Sci. (Geol.),
E-mail: gngahramanov@gmail.com,
State Oil Company of Azerbaijan Republic (SOCAR), Baku, Azerbaijan;
M. Babayev, Cand. Sci. (Geol.),
E-mail: m.s.babayev@mail.ru,
Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan;
S. Shpyrko, Cand. Sci. (Phys.-Mat.),
E-mail: sshpyrko@gmail.com,
Department of Marine Geology, National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine;
Kh. Mukhtarova, Cand. Sci. (Geol.),
E-mail: mukhtarova.khuraman@mail.ru,
Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

SUBSIDENCE HISTORY AND HYDROCARBON MIGRATION MODELING IN SOUTH CASPIAN BASIN

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком та канд. геол. наук, доц. А.П. Тищенком)
We study the mechanisms of migration and spacial distribution of hydrocarbon deposits along a regional 1000 km long SW - NE seismic cross section of the South Caspian Basin. A retrospective 2D geological simulation of basin subsidence and sediment filling history is performed taking into account accompanying processes of thermal and catagenetic transformations of organic matter, and subsequent migration and accumulation of hydrocarbons.

The start of the basin opening with accumulation of considerable sedimentary mass can be dated as middle Mesozoic (Triassic or Jurassic), and hydrocarbon prone horizons can now be located at depths of 12 km. The hydrocarbon saturation of the Pliocene Productive Series is of epigenetic (allochthonous) nature, which is also confirmed in literature by geochemical data from mud volcanoes and by other facts. Geochemical age, depth of provenance and reworking degree of hydrocarbons point at generation sources in Mesozoic (gas) and Paleogene-Miocene formations (oil) with only subordinate participation of the lower "Productive Series" Pliocene suites. The dominant migration pattern of fluids is interformational (interstratal) intermittent injective subvertical flow along disjunctive planes, zones of increased fracturing and loose rocks, diapir intrusion contacts, eruptives of mud volcanoes, lithofacial unconformities and other structures, breaking the rocks continuity. This implies the possibility of commercial-scale accumulations of hydrocarbons at ultra high depths, if trap structures of sufficiently large sizes are available, comparable with already discovered giant oil and gas fields (Shah-Deniz, Azeri-Chirag-Gyuneshti etc).

Keywords: hydrocarbon migration, sedimentary basin modeling, backstripping, deep hydrocarbon potential, PETROMOD

Introduction. The South Caspian Basin (SCB) with up to 15–25 km thick sediment cover, especially in its central parts, belongs to the deepest sedimentary basins of the world. According to modern views, this is a backarc basin of Tertiary age, closely related to Alpine orogenesis (Zonenshain and Le Pichon, 1986; Khain et al., 2009). These values of sediment thickness are confirmed mostly by gravimetry and seismic surveys (Brunet et al., 2003). Characteristic features of SCB are avalanche sedimentation, extremely high subsidence rate during Pliocene and Quaternary, and anomalously low subsurface temperatures (Smith-Rouch, 2006; Kerimov et al., 2010; Rachinskiy and Kerimov, 2015). This basin is one of the world oldest oil exploration regions with unique oil and gas reserves (proven reserves above 20 bln barrels of oil equivalent (Abrams and Narimanov, 1997; Smith-Rouch, 2006; Klett et al., 2010).

Most oil bearing and prospective Azerbaijan regions feature two hydrocarbon layers, of Pliocene and Mesozoic age, respectively (Khain, 2005), separated by a thick Paleogene-Miocene clayish formation. The lower HC level in SCB is generally traced down to depths of ca. 6.5 km in Upper Mesozoic and Lower Cenozoic sediments (Guliyev et al., 2003). Cenozoic layers are essentially better explored, and most basin simulation projects deal with these horizons (depths to 2–3 km). The most explorable HC-generating layer is the Maykop suite (Oligocene) and its overlying "Productive Series" (Smith-Rouch, 2006; Vincent et al., 2010; Bonini et al., 2013), which consists of Pliocene sequences of varying lithology. The lower (Mesozoic) HC layer is more complicated structurally, with multiple sedimentation breaks and structural unconformities. Mesozoic oil in Azerbaijan is still an unresolved challenge. Exploration works nowadays tend at Mesozoic HC prospecting (Guliyev et al., 2009). However, drilled wellbores mostly pierce in Cenozoic sediments, they rarely reach Upper Cretaceous strata. Information about the underlying Mesozoic (Triassic and Jurassic) suites originates from geophysical interpretations and simulations (Glumov et al., 2004; Artyushkov, 2007; Golonka, 2007; Piip

et al., 2012; Rachinskiy and Kerimov, 2015). Even more hypothetical are inferences about possible underlying Paleozoic layers, especially in view of the discussions about the opening time of SCB (Berberian, 1983; Zonenshain and Le Pichon, 1986; Abrams and Narimanov, 1997; Brunet et al., 2003; Khain, 2005; Artyushkov, 2007; Golonka, 2007). The unique Shah-Deniz gas condensate field has been recently discovered at a depth of ca. 7 km in SCB. Similar deep-laying oil and gas fields are known worldwide. The discovery of major HC fields at ultra high depths poses the challenge of exploring the structures and HC bearing capacities at these depths, where common horizontal layered models for shallow intervals appear inadequate.

There are two competitive views on the origin, migration and accumulation of oil and gas in the area. The supporters of the *syngenetic* origin of hydrocarbons argue that the bulk of deposits was formed by a lateral migration of fluids from the central part of the basin to its periphery (Yusifov and Rabinowitz, 2014; Javanshir et al., 2015). Others support rather secondary, or *allochthonous* HC saturation mechanisms in the mid-Pliocene suites of Productive Series in the western and southern parts of the basin (Inan et al., 1997; Feyzullayev, 2013a). According to this view, most hydrocarbons migrated from deep-seated underlying Paleogene-Miocene and Mesozoic strata through a system of penetrating faults, zones of contact of diapir intrusions with adjacent reservoirs, mud volcanoes eruptives etc. during periods of tectonic activation. A promising field of research in favor of this concept would be mud volcanoes and their relation (apparent, yet still unclear) with HC sources distribution (Huseynov and Guliyev, 2004; Yusifov and Rabinowitz, 2004; Feyzullayev, 2012; Bonini et al., 2013). The supporters of this concept, however, admit the generation of certain amount of HC from the Productive Series in some areas of SCB.

Subsidence simulations and modeling in SCB region are abundant (Inan et al., 1997; Tagiyev et al., 1997; Brunet et al., 2003; Artyushkov, 2007; Green et al., 2009; Abdullayev et al.,

2015; Kerimov et al., 2015; Rachinskiy and Kerimov, 2015; Guliyev et al., 2017). Many authors conclude about the basin initiation during Mesozoic, often relating it to the rift opening in Later Jurassic (Abdullayev et al., 2015). However, there are indications, in particular, 1D modeling on wellbores, that trace back the recorded stages of tectonic subsidence to earlier epochs, including Late Devonian (Brunet et al., 2003). Such data are obtained in Alborz (Iran), southern part of SCB. Studies of thermal conditions over multiple wellbores show, that this is a cold basin compared to similar fields worldwide. Low subsurface temperatures and geothermal gradients are a consequence of the avalanche sedimentation. As a result, rocks below 6 km can still remain suitably cold to reside within the oil or gas generation window. Together with indications of possible early formation (basin as a whole or its parts), this can favor the conclusion about HC producibility zone in SCB stretching essentially below the deemed 6,5 km limit, and reaching 10–15 km. The discovery of such fields at ultra high depths is probable in young basins with rapid sedimentation (10–15 MA old) (Kerimov et al., 2015), which is the exact case of SCB at its modern stage. Therefore, justification of the lower boundary of HC distribution in this sedimentary basin is of primary importance. Confirmation of this assumption gives additional arguments in favor of the secondary (allochthonous) HC saturation of the Productive Series, hence, allows refining local migration models as well.

To examine this, regional 2D modeling was performed (Welte et al., 2000; Makhous and Galushkin, 2005; Kauerauf and Hantschel, 2009) along several interpreted seismic profiles. The principal attention is paid here to the results along a ca. 1000 km profile with SW-NE trending, crossing major regional tectonic structures in the direction of assumed tectonic flow at Tethys closure and collision of Arabian and Eurasian plates. The HC migration and accumulation modeling was also performed along the profiles for several temporal snapshots, including the moment of Pliocene Productive Series formation and present time.

The aim of the work is the study of HC generation, migration, accumulation mechanisms and their spatial distribution along a section of the SCB depression. Section 2, continuing the Introduction, presents general knowledge of the geology, lithology and stratigraphy of SCB sediments. Principal HC generating suites are briefly described. A short reference is given of the local stratigraphic nomenclature, mostly for Neogene suites (Productive Series). In Section 3, the computer modeling of the basin paleoreconstruction, and HC migration and accumulation in PETROMOD software is described. Section 4 presents the modeling results for the Basin paleohistory and HC distribution along a regional profile and locally (as case study of a giant field). Section 5 and Conclusion present the results as compared to other simulations and empirical wellbore data; possible reasons for inconsistencies and ways of future model improvements are discussed. General conclusions on the deep HC potential are drawn and future researches are outlined.

Materials and methods: Geological settings. Caspian region is a structure with complicated geology and tectonics, featuring the conjugation of continental structures with different ages: East European (pre-Cambrian) platform, Skythian-Turanian platform and Alpine fold systems on the South. Three major geological units are distinguished: North Caspian, Middle Caspian and South Caspian (Guliyev et al., 2003; Glumov et al., 2004; Khain et al., 2009; Rachinskiy and Kerimov, 2015). The South Caspian depression is a tectonic structure within Alpine-Himalayan mobile belt. Modern tectonic setting of the South Caspian depression is bound to the southern Caspian Sea and adjacent onshore

zones of Eastern Azerbaijan, Western Turkmenistan and Northern Iran (Figure 1).

The prevailing point of view assumes the origin of SCB as a post-rift basin with underlying (sub-)oceanic crust (without a granite layer), featuring abnormally high subsidence and avalanche sedimentation in Upper Neogene-Holocene. Indicative sedimentation rate for Mesozoic cycle is 40–90 m/MA (meters per million years), for Paleogene-Miocene: 35–80 m/MA, and for Pliocene-Holocene: 350–900 m/MA (Glumov et al., 2004; Kerimov et al., 2015). The average thickness of the sedimentary cover varies from 7–8 km to 28–30 km, reaching maximum in the most subsided offshore parts of the South Absheron depression and Baku Archipelago. Three formation layers are distinguished, strongly differentiated by their lithofacial composition (Aliyev and Aliyev, 2011):

- 1) Meso-Cenozoic terrigenous and carbonate formation (Lower and Middle Jurassic to Upper Cretaceous, 4–11 km thick);
- 2) Paleogene-Miocene, predominantly clayish, comprising Danian and Pontian (2,5–5,5 km); and
- 3) Pliocene-Holocene, interleaved sand and clay facies with thickness of 6–7 km.

The synthetic stratigraphic column in Fig. 2 summarizes the geology of Miocene-Pliocene reservoir and source rocks. The prospective Productive (or Redstone) Series is composed of clastic terrigenous material. Its nine suites are clearly separated into two groups, divided by the Break (or Fasila) Suite. The lower group is dominated by Quartz in clastic sediments, and traced to the Paleo-Volga riverwash. The upper group contains less Quartz compared to feldspar etc, and clastic fragments relate to sedimentary and volcanic rocks with provenance from Paleo-Kura river (Abrams et al., 1997; Vincent et al., 2010). The underlying Maykop suite (top Oligocene – lower Miocene) is an important regional source rock horizon with analogs of the same age stretching up to Carpathians. It is composed of dark clayish rocks with abundant organics and sedimentation in anoxic environment. To a lesser extent, the Diatom suite above Maykop is also considered as a HC source rock (Smith-Rouch, 2006; Javanshir et al., 2015).

Within SCB, several separated generation foci of HC can be revealed in different Mesozoic-Cenozoic strata. Five HC generation intervals are distinguished: two Mesozoic (middle Jurassic, lower Cretaceous), Paleogene – Upper Miocene (mostly Maykop), Middle and Upper Miocene (Diatom) and Lower Pliocene (Kalinsk suite in the lower part of the Productive Series) (Guliyev et al., 2001, b; Guliyev et al., 2003).

The upper formations (Productive Series) are composed of extended contiguous permeable layers, capable of lateral fluid migration, that is they correspond to the custom horizontal layered reservoir concept. However, deep horizons feature block and block-layered structure (Guliyev et al., 2017). In SCB, these depths are Paleogene-Miocene and Mesozoic strata. As a consequence, there are no favorable conditions for regional migration flows. A new type of hydrodynamical systems with intermittent (pulsation) injection dominates there, covering important ranges of deposits and characterized by large-scale distribution of vertical interformational flows over networks of high amplitude faults (Feyzullayev, 2012). Deep fluids are unloaded predominantly vertically. During tectonic activation periods, the mixtures of gases and fluids can disrupt the layers of the sedimentary cover and form interlayer intrusions, and even reach the surface as mud volcanoes (Yusifov and Rabinowitz, 2004; Davies and Stewart, 2005; Feyzullayev, 2012; Guliyev et al., 2017). These particular features at ultra high depths are crucial for modeling and assessing of the HC potential of deep subsidence basins.



Fig. 1. General layout of SCB, modeling profiles and major oil&gas fields. Red line (C-C'): regional SW - NE profile, Figs. 4, 5; blue lines (inset, a-a', b-b'): profiles used in local migration model of ACG field, Fig.6, a, b

Principles of geological modeling in SCB. The key technique for the exploration of the deep structure of SCB is the basin simulation (Makhous and Galushkin, 2005; Kauerauf and Hantschel, 2009), referenced to the modern geological setting and certain independent indicators (e.g., location and composition of mud volcanoes, sedimentation data and geochemical logging in ultradeep wellbores).

The computer simulation of the sedimentation history and HC distribution at several time marks in SCB was performed with PETROMOD (2D modeling over several interpreted seismic sections). Most known 2D modeling packages can also simulate fluid flow rates in (X,Z) plane. PETROMOD package can simulate three-phase displacement (system of oil+gas+water), secondary migration and accumulation of hydrocarbons. The distribution of HC saturated solution over section is calculated from the application of Darcy law taking into account capillary pressure, or with a hybrid FlowPath technique (Witte, 2000). The cycle of 2D simulation runs was designed for two groups of problems: 1) sedimentation modeling over geological past (diachrony) and 2) HC migration and distribution modeling over relatively short time scale (for example, for the Productive Series deposition).

The regional SW-NE trending profile for PETROMOD 2D simulation, about 1000 km long, is shown as C-C' line in Fig. 1. It crosses Pre-Alborz, Lower Kura, South Absheron depressions. The modeling of HC migration and accumulation was also performed over other seismic sections at smaller scale, in particular, across oil structures Kyanizadag, Sangachal, Duvanny, Harya-Zirya and Bulla-Deniz (line A,

Fig. 1), and southwards, along the line B in the South Kura depression (see Fig. 1). These smaller profiles were chosen to cover large onshore and offshore fields with general direction across dominating trends of tectonic structures. We give here representative results mostly for the region-wide C-C' profile, which crosses main Caspian structures from pre-Alborz depression towards Turan plate.

	Epoch	Age	Suite	Lithology
Miocene	Holocene	Productive Series PS	Baku	
	Pleistocene		Absheron Akchagyl	
	Upper		Surakhany	
			Sabunchy	
	Middle		Balakhany	
			Fasila	
	Lower		Nadkirmaky cl. NKG Nadkirmaky sand NKP	
			Kirmaky KS Podkirmaky PK	
			Kalinsk KaS	
			Pont, Meot., Sarmat. Diatom	
Oligocene		Maykop suite		
Eocene				
Paleocene				
Cretaceous				

Fig. 2. Synthetic local stratigraphic chart of SCB Neogene. Lithology is schematically denoted by dots (sandstone reservoirs), hatches (clay seals) and by wavy hatching (source rocks)

Principal parameters for the input of the basin reconstruction simulations include: 1) initial state (geological cross section at present time); 2) temperature-depth dependence, including assumptions about its evolution in the past; 3) sedimentation and subsidence rates for different geological ages; 4) assumed reconstructions of the thickness change due to horizontal tectonic movement (backstripping) (Makhous and Galushkin, 2005; Mustayev, 2013; Kerimov et al., 2015).

We took interpreted geological sections from 2D seismic as input data (starting point for backward modeling). The initial cross section for the "main" regional profile C-C' in Fig. 1 is given, for example, in (Glumov et al., 2004). Similarly, recent interpreted 2D seismic data was used for runs over other profiles.

Temperature is the principal factor of conversion of the organics into hydrocarbons. Thermal regime of a basin with its assumed evolution over time is a key input into modeling programs. For SCB, over 4,500 measurements of formation temperatures are available for depths over 5000 m (Tagiyev et al., 1997; Guliyev et al., 2003; Guliyev et al., 2009; Rachinskiy and Kerimov, 2015). Generalized temperature-depth curves for SCB and similar giant world basins are

given for reference in Figure 3. For a brief outline of the geothermal conditions in SCB, see (Gahramanov et al., 2019). The principal feature of SCB is its anomalously low heating of Pliocene and Quaternary strata, which makes it one of the "coldest" world basins. Such environment implies the possibility for HC generation even for depths to 10 km.

For the temporal evolution of the geothermal regime, a commonly used approach is adopted with simplified assumptions for SCB (Green et al., 2009; Kerimov et al. 2010; Abdullaev et al., 2015). The supposed permanent subsidence of SCB allows to assume that paleotemperatures during sedimentation (Mesozoic-Miocene) did not essentially differ from modern ones, measured in wellbores at corresponding depths, and $t(H)$ dependences can be used as reference curves with appropriate recalculation of depth marks. The paleotemperatures of already deposited formations in earlier epochs (e.g., Mesozoic deposits in the period from Paleogene to Miocene) are estimated by progressive summation of temperature increments downwards from the reference point, taken as the modern temperature at the Productive Series base. These issues are comprehensively described by (Kerimov et al., 2010).

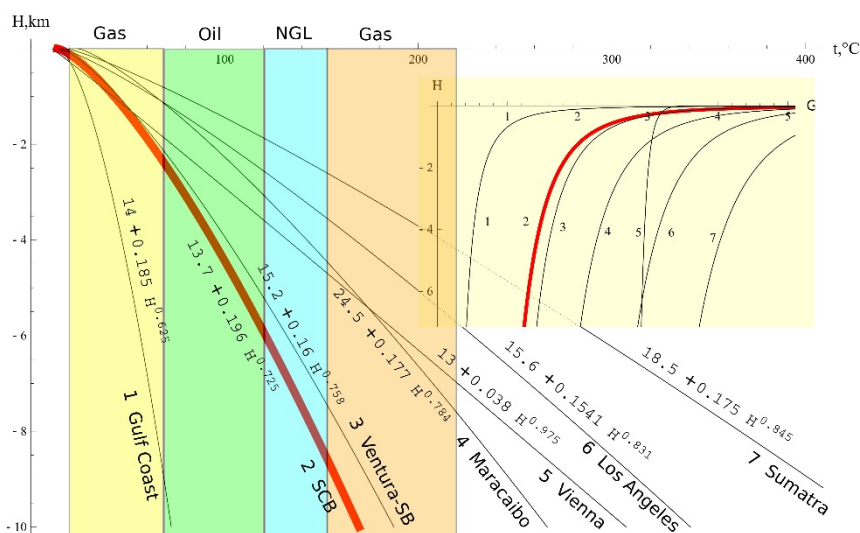


Fig. 3. Geothermal environments in major basins. SCB (No.2) is marked with a red line.

Color bars schematically outline generation windows for HC fractions. The inset shows thermal gradients (in °C/100 m)

Other parameter inputs into the modeling algorithms include sedimentation and subsidence rates. They are obtained by backstripping analysis over ultradeep wellbores and outcrops on flanges (Kerimov et al., 2015) and were briefly described above. For a permanent subsidence of the basin with ultradeep (up to 25 km) sedimentary deposits, a natural conjecture for modeling is the compensation of these two factors neglecting the contribution from other tectonic movements (subduction, folding etc).

As an indicator of thermal maturity, the vitrinite reflectance R_o is used. Hydrocarbon fractions are identified by conventional limits of temperature windows for oil, gas and condensate formation supported by wellbore data. The obvious simplification is that catagenetic transformations are the same across SCB and predominantly controlled by temperature. HC generation and migration modeling in PETROMOD is based on the kinetic schemes of kerogene decomposition with account for lithology, thickness and limiting saturation of the source rocks. The simulation of oil and gas generation was performed according to the first order kinetic scheme (Tissot et al., 1987; Burnham, 1989; Burnham, 2015) with a number of parallel reactions. This scheme is one of the two routines embedded in

PETROMOD. The maturity modeling in this work is performed according to (Sweeney and Burnham, 1990). Six maturity zones are defined and labeled by the maturity parameter: undermature (below 0.5 % R_o), early oil generation (from 0.5 to 0.7 % R_o), peak (middle) oil (0.7–1.0 % R_o), late oil (1.0–1.3 % R_o), gas (1.3–2.6 % R_o) and overmature (above 2.6 % R_o). In the simulation of HC migration towards traps, pressure and lithology of rocks is taken into account. The accumulation modeling considered the properties of the overlying strata, and the presence of faults, conducting HC to the surface.

Results: Basin evolution and HC migration in SCB at a regional scale. The results of the computer simulation along the profile C-C' in Fig. 1 are presented in Figs. 4 and 5 (SCB is on the left part of the figures, corresponding to SW edge of the profile). Fig. 4 outlines the basin evolution up to its present state, and hydrocarbon content of stratigraphic intervals, determined according to simplified assumptions, as described above. The stratigraphic arrangement for the present time moment (last panel in Fig. 4) is derived from the geological interpretation of the corresponding seismic profile, and constitutes the initial step for the lookback modeling. For clarity, we stripped lithology and tectonic related layers (faults etc) to

avoid overcrowding of panels in Figures; this information can be retrieved from the next Fig. 5.

In the Late Devonian several areas of the future basin (its south-western and northern edges) were filled with considerable sedimentary masses from the Early Devonian, already at the maturation stage, sufficient for HC generation. At the beginning of Triassic, the maturation process continued, and lower Devonian strata became overmature; Permian sediments were still beyond the maturity window.

At the beginning of Cretaceous, Jurassic reservoirs had already started to accumulate hydrocarbons. To that time, source rocks were Triassic sediments at a depth of 3 km,

and the main gas generation window was located at ca. 5 km. Before the beginning of Paleogene, available hydrocarbons migrated towards surface without being retained within the formations because of caprocks lacking. Up to the Early Paleogene, traps had already been formed as anticline structures, and caprock structures appeared as well. Underlying reservoirs (Jurassic and Cretaceous) mostly accumulated liquid HC fractions. Note also the 17 km thick sedimentary cover at the south-western margin of the depression to that time. However, Carboniferous-Permian rocks had already left the generation window, and became overmature.

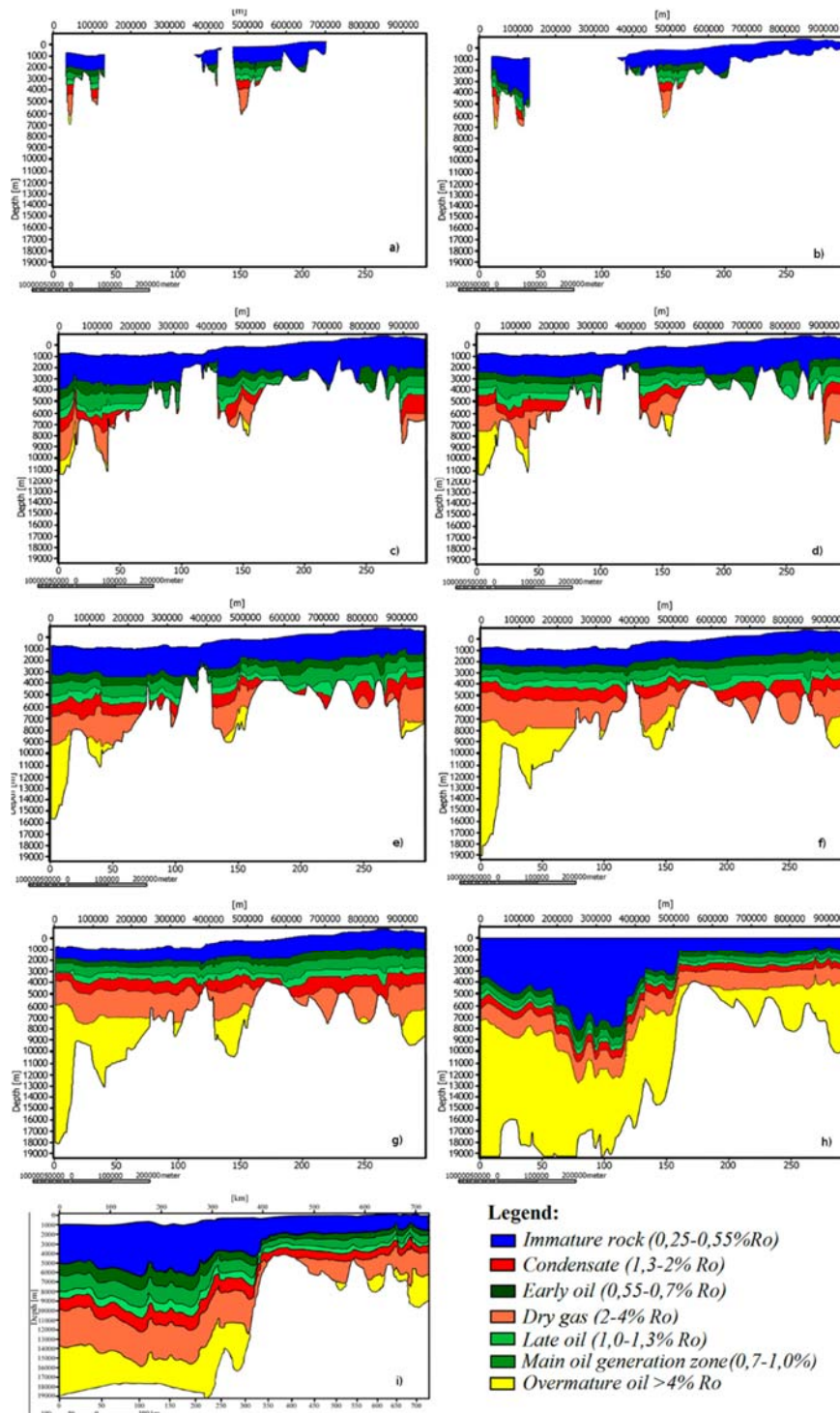


Fig. 4. HC generation models and basin evolution along C-C' profile from Devonian till present. Maturity stages are color marked.
 Snapshots for: a) Late Devonian; b) Late Permian; c) Early Triassic; d) Early Jurassic; e) Early Cretaceous; f) Early Paleogene; g) Early Neogene; h) beginning of Late Neogene; i) present

By the beginning of Early Neogene, the main oil generation zone was located at a depth of 2,5–3 km, and the gas zone at 3,5–4 km. Till the beginning of the Late Neogene the basin is distinguished by an avalanche subsidence with deposition of up to 22 km thick sedimentary masses. This process is ongoing.

The SCB simulation results for the actual time moment (last panel in Fig. 4) indicate the oil and gas generation zone, stretching for 8–15 km with upper boundary at 5–7 km and lower boundary extending somewhat up to 18–20 km downwards (in the most subsided parts of the depression). Such localization of the generation window suggests that the fluid generation zone spans rocks with ages from Mesozoic till the beginning of Pliocene. The lower boundary of the gas generation window refers to Paleogene and Mesozoic sediments, and the upper boundary of the oil generation – to Miocene. It is expected, that Mesozoic strata are characterized by the predominant generation of mature gas, and the whole spectrum of generated fluids can be responsible for the formations of Paleogene-Miocene.

The simulation results on short profiles A and B (Fig. 1) will be a subject of a more specialized contribution. The results for the eastern edges of these profiles, which enter SCB in the locations far from the regional C-C' profile, allow us to independently confirm certain trends, revealed for the "long" profile. Specifically, at the eastern margin of A profile the Oligocene (Lower Maykop) rocks were in the gas window during deposition of the Productive Series. At present, Upper Maykop rocks are located within the gas generation window. In contrast to the profile A, which stretches close to the Northern flange of the basin, the profile B crosses the depression of Kura river, and its eastern edge runs into the most subsided parts of SCB close to its center. At present time, the main oil generating window at the eastern edge of this profile involves Oligocene-Miocene rocks and is located at a depth of 3,5–5,5 km. The gas generation zone is located at a depth of 6–9 km, spanning across Cretaceous and Upper Jurassic strata.

The simulation of the basin history backwards in time shows marked trends of separation and individualization of SCB compared to the Turan platform in the north (right part of Figs), which became emphasized in Cretaceous-Paleogene. The snapshot at the beginning of Late Neogene is a special moment of the basin history, since it corresponds to the beginning of the Pliocene Productive Series deposition. It is characterized by several extended layers of caprocks, generally of clayish lithology (Kalinsk (KaS) clay top, Nadkirmaky clay (NKG), clay top of the Fasila suite (SP) etc), which were deposited relatively recently and formed natural barriers for vertical HC migration from underlying horizons, e.g., from Maykop and Diatom suites. The availability of such regional wide caprocks at predominantly horizontal layered tectonic setting of the upper formations (a subordinate role of faults and other vertical migration channels) resulted in the essential contribution of the lateral HC migration in these layers. Results for the regional distribution of HC along C-C' profile are exemplified in Figure 5 for the present time moment, where oil (green color) and gas (red) areas and migration routes are well separated. For other simulation runs, reconstructed sections for the beginning of Late Neogene and other time moments were also considered as base.

As the migration models show, some hydrocarbons, migrated from source rocks during Neogene, could not form deposits due to the fact that by this time considerable regional seals had not been formed yet, so a part of the hydrocarbons had migrated upwards along fractures and

dissipated. This process must be still ongoing, as the snapshot in Fig. 5 clearly indicates for the zones of deep penetrating fractures. Some of already formed deposits have been destroyed by high temperatures and pressures at subsurface during intensive basin subsidence in Cenozoic. The oil migration rates range from several to several hundreds kilometers per 1 million years. The formation time of the accumulated structures is from 1 to 100 MA. It is controlled by both migration rates and path lengths. Considerable thickness and volumes of sedimentary masses in the main generation window, intense tectonics and considerable geological time elapsed after the finishing of HC generation favor the migration and displacement of HC deposits upwards in the sedimentary cross-section from the deep zones of catagenetic generation. The principal element of the generation and accumulation scheme is the stepwise pulsation and injective mechanism of migration.

Case study: HC migration and accumulation in ACG structure. The giant ACG (Azeri-Chirag-Gyunesli) oil field is an extended SE trending 100 km long structure associated with multiple dome-shaped risings in an anticline fold, forming a trap for hydrocarbons. On the regional profile, this is a short section at the "kink" of the profile line in its middle part (Fig. 1). ACG field has both oil and gas condensate deposits. The distribution of HC fractions over the Productive Series reservoirs is in apparent contradiction with the assumption of vertical migration mechanisms only. The upper part of PS (Balakhany and Fasila suites – see Fig. 2) contains oil, and the lower strata (Nadkirmaky, Podkirmaky and Kalinsk) are mostly filled with gas. In case of vertical migration, the cap rocks, which had let oil flows pass through, would have transmitted gas as well, so upper formations should be dominated by gas fractions, which is exactly the case of the nearby Bakhar field. To explain this inconsistency, a qualitative model for this deposit was designed based on the regional simulation and general scheme of conjectured HC migration. It combines both vertical and intralayer migration mechanisms. It is supposed, that generated hydrocarbons first migrate vertically through clayish strata until they meet a first laterally extended formation of permeable rocks. Then, HC distribute laterally over that layer towards the trap. Depending on the trap size and its sealing properties, HC would either fill up the trap and start spilling into the adjacent structures, or break the impermeable bed and flow into upper layers. As a result, upper and lower formations of the Productive Series are filled separately according to different mechanisms, that is with different relative contributions from lateral and vertical migration. So, the formation of the gas condensate layers at the bottom of the Series (Fig. 6, a) occurred through the predominately lateral mechanism by migration from a focus on the east through reservoirs of the lower suites (Podkirmaky, Kalinsk). The clay top of the Nadkirmaky suite (NKG) is an excellent regional seal rock. This focus (Maykop and Diatom rocks) is relatively sunken and fits partially the gas generation window; therefore, gas partially displaces oil in the lower formations of Productive Series in anticline traps (Fig. 6, a). Vice versa, oil prone "tops" of the Productive Series (Balakhany and Fasila suites) are formed through another route, via Absheron structures, located to the southwest (Fig. 6, b). Here, the seal rocks of NKG suite are less dense because of increased sedimentation rate (towards SCB center), so the anticline traps of Absheron host gas fraction, breaking the NKG suite and displacing oil to adjacent structures. Oil migrates laterally through Fasila and Balakhany suites (upper part of PS) and rises along strata in the north-eastern direction towards ACG traps.

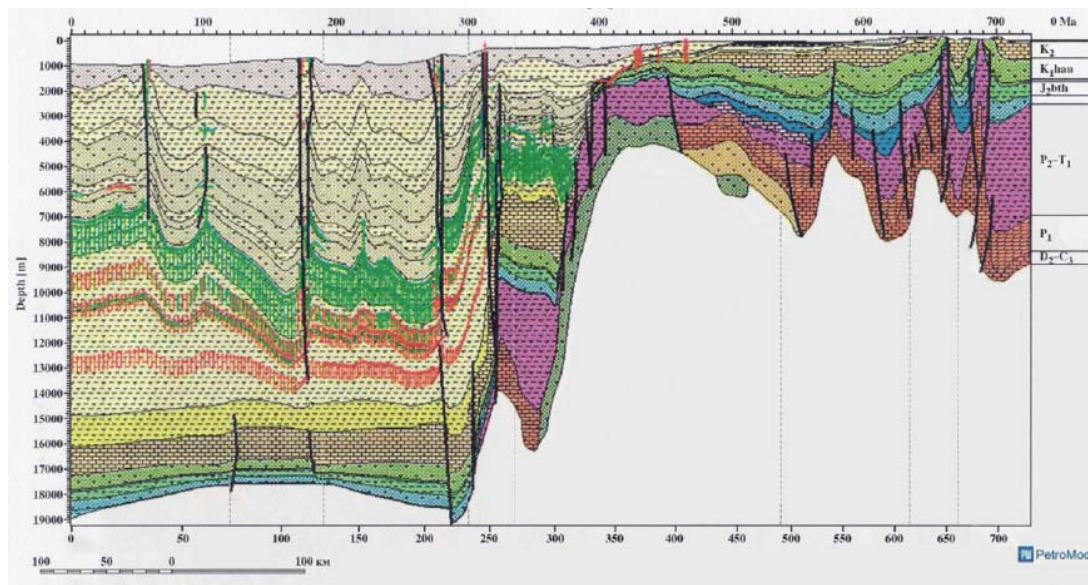


Fig. 5. Oil (green) and gas (red) migration model along the regional profile C-C'

Discussion. The key issue for the design of the HC distribution models in SCB and one of disputable questions is the basin opening time. Most authors agree on the point that the start of the basin formation is related to the rift opening in Mesozoic, during Cretaceous or Middle Jurassic (*Zonenshain and Le Pichon, 1986*), or at the boundary of MZ and Pg (*Abrams et al., 1997*). Some approaches directly postulate the rift formation event, e.g., in Middle Jurassic, as a starting point for simulations (*Green et al., 2009; Abdullayev et al., 2015*). Several authors consider the possibility of multi-stage basin opening (*Golonka, 2007*) with stage ages from early Mesozoic to Miocene. The models are also known, suggesting more early opening or formation according to pull-apart mechanism. So, it is assumed (see (*Berberian, 1983*) and references therein), that the basin can be a remnant of PaleoTethys, captured during Kimmerian convergence, so the crust age would reach Paleozoic or early Mesozoic. According to our results, a considerable sedimentary cover appeared in the SW and NE parts of the future SCB already in Devonian. These points correspond to Alborz trog and Greater Caucasus structure. On the one hand, this can be a consequence of an unjustified extrapolation of sedimentation data backwards in time. On the other hand, synthetic data on two wells near Alborz (see Fig. 5 in (*Brunet et al., 2003*), boreholes No. 5, 6), one of which is located close to our profile, indicate at the start of sedimentation and subsidence of these structures in Devonian, thus agreeing with our results. The interpreted geological cross section by (*Brunet et al., 2003*) in the NW–SE direction also points at the existence of the Paleozoic crust near Alborz structures. At the same time, (*Brunet et al., 2003*) disprove the existence of a sedimentary cover with comparable thickness in the northern part of the depression, suggested by our results. These areas, according to (*Brunet et al., 2003*), are filled with Mesozoic volcanic sediments, therefore it is possible, that the extrapolation for these areas yielded an overestimated age without account of this Mesozoic volcanism.

Next, the depression itself opens approximately in Triassic, and the depth of the basin and the properties of organic matter are comparable to the results in the NE part of the profile (Middle Caspian depression). At the corresponding snapshot (Fig. 4, panel c)), the SW part of the basin close to Alborz structures already acquired the thickest sedimentary cover in the area. These results agree up to that point with models, dating the depression opening back to Mesozoic (*Zonenshain and Le Pichon, 1986; Brunet*

et al., 2003; Green et al., 2009; Abdullayev et al., 2015), rather than to Upper Mesozoic-Paleogene (*Abrams et al., 1997; Khain, 2005*). The agreement of the timing results with mentioned well data on Alborz structures suggests their feasibility at least for the southern part of the depression.

The modeling states, that HC generation in Jurassic sediments in the northern part of the basin started in Early Cretaceous with gradual shift of the fluid generation foci towards its western part and central part of the Absheron peninsula. General trends of SCB evolution are confirmed by the recent detailed 3D simulations of the Northern part of SCB (*Babayev and Gadiyev, 2006; Kerimov et al., 2015*). In particular, for sediments of several time snapshots (Jurassic, Lower Cretaceous) in 2D modeling the tendency is marked of the decrease in maturity in the direction from most subsided central SCB areas towards north-east (Absheron rising in the center of the profile line). This is markedly seen on the corresponding 3D model graphs. This trend correlates with the spatial distribution of ^{13}C isotope enrichment: HC isotope composition becomes heavier in ^{13}C towards the most sunken parts of SCB (*Guliyev et al., 2001 a; 2003*). This general conclusion is justified by the ages of oil and condensate (*Inan et al., 1997; Guliyev et al., 2001 a, b*). The oil ages on the western SCB flange vary in the range 94–175 MA, the ages of condensates - within 80–115 MA (*Kerimov et al., 2010* and references therein). Geochemical studies of gases and organic matter in mud volcanoes, associated with Pliocene deposits, point at their deep provenance (5–15 km for gases (*Feyzullaev, 2012*)) and profound reworking (*Bonini et al., 2013*). The need for essential vertical migration to adequately explain the HC composition from geochemical data is stressed by (*Katz et al., 2000; Gürgey, 2003*). According to (*Katz et al., 2000*), gas composition points at mixed biogenic and thermogenic HC provenance from source rocks below the Maykop suite. Multiple geochemical studies, especially earlier ones (*Gürgey, 2003; Abrams et al., 1997* and references therein), adhere to more conservative concepts, claiming the predominant HC formation in OI-Mi Maykop and Diatom sediments with variety of opinions as to the role of vertical migration. Finally, geochemical evidences of HC formation mostly in nearshore and deltaic environments (for example, by the fraction of ^{13}C content in aromatic vs alkane hydrocarbons - (*Guliyev et al., 2001b; Guliyev et al., 2003*) argue in favor of the epigeneticity, since Pliocene reservoirs are known to form in the environments of closed limnetic fresh water pools.

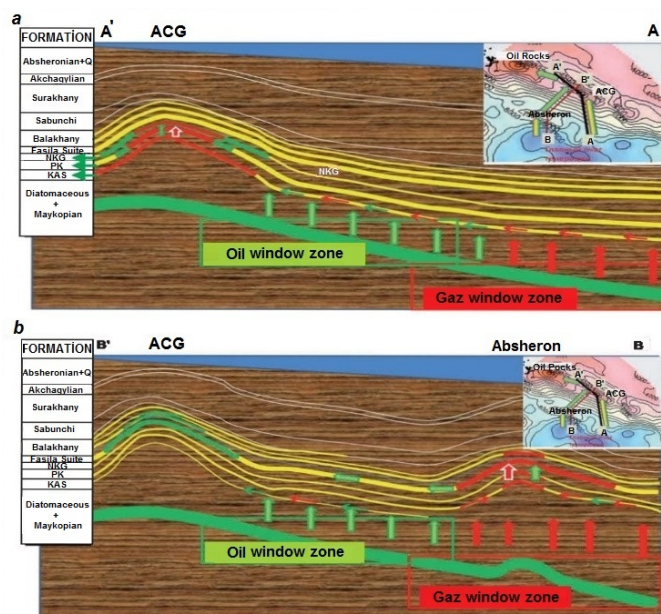


Fig. 6. Hydrocarbon migration model near ACG oil field (modified from (Guliyev et al., 2016)).

a – NW-SE profile (a-a'); formation of bottom (gas condensate) part of the Productive Series, eastern flow; b – NE-SW profile (b-b'); formation of top (oil prone) part – western flow

Geothermal data and stratigraphy show, that in most SCB areas Mesozoic rocks (thickness 4,5–11 km, top and bottom temperature 167–424 °C) now generate high temperature carbon dioxide and Nitrogen; Paleogene-Miocene (thickness 2,5–2,0 km, 76–237 °C) are donors of oil, wet gas and condensate and partially – of late catagenetic methane. Pliocene-Holocene rocks generate early catagenetic methane and minor amounts of early generation oils (Guliyev et al., 2001, a; Kerimov et al., 2010; Feyzullayev, 2013, b). The results on short profiles A, B also fall in this general pattern, indicating that in the most subsided areas (continuation of B profile) the modern gas generating zone is located within Mesozoic sediments (depths about 10 km). As simulation suggests, and wellbore data at moderate depths confirm, the oil and gas generation zone in SCB can reach the depths of 8–10 km, the zone of condensate and wet gas – up to 12–14 km, that is HC generation processes are active mostly in sediments underlying the Productive Series. This conclusion supports the predominantly secondary nature of HC saturation of PS, thus the results testify in favor of the allochthonous HC concept (Inan et al., 1997; Bonini et al., 2013; Feyzullaev, 2013, a; Guliyev and Bagirov, 2016). An additional argument for this mechanism is the anomalous formation pressure in the Pliocene reservoirs. (Guliyev and Bagirov, 2016) conjecture, that its principal cause are injections of high pressure fluids from the underlying strata within local risings and anticlines (cf. case study for the ACG field). The estimates for HC potential depths were performed without taking into account anomalous formation pressures. It is commonly assumed, that overpressure plays merely a subordinate role in HC transformation compared to temperature and time, and numerous overpressure zones in SCB (Feyzullayev, 2013, a) control first of all the HC flow patterns. However, the general impact of the overpressure on HC maturation is its retardation due to the formation of a closed thermodynamical system with obstructed migration outwards (see (Feyzullayev, 2013, b) and references therein). This is a favorable factor for the preservation of the HC generation ability at ultra high depths. This allows to expect a further extension of the oil and gas windows compared to the model. Refinements of model results should embed the pressure factor into the kinetics

simulation. The HC distribution modeling shows, that both vertical and lateral migration patterns matter. The balance of migration types varies by horizons and areas and is determined by the rigidity and rupture strength of the seal rock and the availability of fractures, cracks and loosened crust areas nearby. These latter can be revealed by the concentration of mud volcanoes in this area (Huseynov and Guliyev, 2004; Bonini et al., 2013). On the one hand, they are additional prospecting indicators for verification of HC migration and accumulation models. On the other hand, they act as natural ultradeep wells providing information on the deep structure. For example, intense mud volcanism in SCB is mostly related to the lower hydrocarbon layer; vice versa, many oil deposits show no genetic relations with HC of the upper Productive Series (Aliyev and Aliyev, 2011). The ACG field, like other major fields (Shah-Deniz etc), is a typical example of a structure, associated with mud volcanism. Such an association can be an additional argument for the allochthonous hypothesis of migration.

Conclusions. The principal result of the work is the confirmation of systematic character of lateral and vertical HC migration patterns over the cross section of SCB, and of the regular evolution of HC formation foci in time, generally towards the central zone of South Caspian. The modeling results suggest the expansion of the limits of the hydrocarbon potential downwards to depths to ~12 km. Prospecting works in the future should be designed taking into account this observation.

The conjectured opening time of SCB is Triassic. However, comparison with synthetic wellbore data and cross sections indicates possible overestimation of structures age in the northern part of the basin, qualitatively agreeing with data for its southern part. To improve the paleoreconstruction, it is necessary to refine the models of paleotemperature and sedimentation/ subsidence rate change, especially for the northern flange of the basin (Abscheron depression) taking into account Mesozoic volcanism in this region.

The correlation of the modeling results with geochemical ages, provenance depth and reworking degree for oils, gas and condensate confirms their epigenetic character in the hosting Pliocene-Holocene and Paleogene-Miocene series, and, reciprocally, their qualitative coeval identity and

physico-chemical correspondence to the thermobaric conditions, characteristic of modern occurrence of the underlying Mesozoic strata. The principal source rock for low grade hydrocarbons (gases) are Mesozoic zones; for high grade hydrocarbons (oil and condensate) - Paleogene and Miocene sediments with only subordinate participation of the lower formations of the Productive Series. The modeling also supports geochemical data on the decrease of HC ages from edges towards the center of depression.

Since HC migration over the area is epigenetic with dominant vertical flows, structures to be discovered in the future at ultra high depths in Mesozoic-Cenozoic sedimentary cover will inherently have giant sizes and share similar migration patterns. Thermobaric conditions suggest, that source rocks for those formations are located even deeper, and HC migration from sources should be initially vertical, then continue laterally. This is already confirmed for depths to 7000 m, so similar processes are to be expected at 8-9 km. The poroperm properties of rocks at such depths can allow accumulation of commercially interesting amounts of HC, only if such structures have giant sizes, similar to Shah-Deniz, ACG, Neft Dashlary, Kyapaz fields and so on. At smaller scale structures these phases are prohibited, since they can not preserve the necessary poroperm properties of rocks due to high lithostatic pressure.

The HC hosting capacity of SCB at depths down to 12 km or more suggests the need for future research to reveal factors, controlling the accumulation of commercial deposits. The investigations should aim at the identification of structural and tectonic patterns, favorable for deposit formation, modeling of petrophysics of reservoir rocks beyond 6 km, and at recovering the geochronological scale for oil and gas generation, migration and accumulation conditions for discovered objects (prospective oil and gas fields). To refine the lower boundary of the HC potential, it is necessary to apply modern simulation schemes, taking into account the overpressure factor in HC generation. Of special interest are mechanisms of vertical migration of heavy hydrocarbons (oil fraction) into subsurface horizons, the composition of C8 – C10 and aromatic fractures. One of the unsolved challenges is the paragenetic relation of HC generation foci with mud volcanoes and their ejecta composition. The study of mud volcanism in its relation to HC zones will give additional reference points for the refinement of local migration models. Geochemical studies should be oriented at the relation between HC content in the explored fields and their source rocks, to adjust and refine the hydrocarbon model of the South Caspian Basin.

Список використаних джерел / References

- Abdullayev, N.A., Kadirov, F., Guliyev, 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. *Geol Soc Spec Publ.*, 427(27). doi: 10.1144/SP427.5.
- Abrams, M.A., Narimanov, A.A. (1997). Geochemical evaluation of hydrocarbons and their potential sources in the western South Caspian depression, Republic of Azerbaijan. *Mar. Petrol Geol.*, 14(4), 451-468. doi: 10.1016/S0264-8172(97)00011-1.
- Aliyev, A.I., Aliyev, E.A. (2011). Deep oil potential. Baku, Azerbaijan: Nafta Press.
- Artyushkov, E.V. (2007). Formation of the superdeep South Caspian basin: subsidence driven by phase change in continental crust. *Russian Geology and Geophysics*, 48(12), 1002-1014. doi: 10.1016/j.rgg.2007.11.007.
- Babayev, D.Kh., Gadjiyev, A.N. (2006). Deep structure and hydrocarbon potential of the Caspian Sea basin. Baku, Azerbaijan: Nafta Press. [in Russian with English abstract]
- Berberian, M. (1983). The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. *Can. J. Earth Sci.*, 20, 163-183.
- Bonini, M., Tassi, F., Feyzullayev, A.A., Aliyev, C.S., Capecciacci, F., Minissale, A. (2013). Deep gases discharged from mud volcanoes of Azerbaijan: New geochemical evidence. *Mar. Petrol Geol.*, 43, 450-463. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2012.12.003.
- Brunet, M.F., Korotaev, M., Ershov, A.V., Nikishin, A.M. (2003). The South Caspian basin: a review of its evolution from subsidence modelling. In: Brunet, M-F. and Cloetingh, S. (Eds.). Integrated Peri-Tethyan basin studies (Peri-Tethys Programme). *Sediment Geol.*, 156, 119-148. doi: 10.1016/S0037-0738(02)00285-3.
- Burnham, A.K. (1989). A simple kinetic model of petroleum formation and cracking. *Technical Report*. Lawrence Livermore National Lab., Livermore.
- Burnham, A.K. (2015). A Simple Kinetic Model of Oil Generation, Vaporization, Coking, and Cracking. *Energy Fuels*, 29(11), 7156-7167. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b02026.
- Buryakovskiy, L., Chilingar, G.V., Rieke, H.H., Shin, S. (2012). Fundamentals of the Petrophysics of Oil and Gas Reservoirs. Wiley. doi: 10.1002/9781118472750.
- Davies, R.J., Stewart, S.A. (2005). Emplacement of giant mud volcanoes in the South Caspian Basin: three-dimensional seismic reflection imaging of root zones. *Journal of the Geological Society*, 162 (1), 1-4. doi: 10.1144/0016-764904-082.
- Feyzullayev, A.A. (2012). Mud volcanoes in the South Caspian basin: Nature and estimated depth of its products. *Natural Science*, 4, 445-453. doi: 10.4236/ns.2012.47060.
- Feyzullayev, A.A. (2013a). Migration Pathways of Hydrocarbons in South-Caspian Basin. *J. Geol. Geosci.*, 2, 127. doi: 10.4172/2329-6755.1000127.
- Feyzullayev, A.A. (2013b). The role of pressure in thermocatalytic processes in the sedimentary complex of the South Caspian basin. *Russian Geology and Geophysics*, 54 (2), 200-205. doi: 10.1016/j.rgg.2013.01.006.
- Gahramanov, G.N., Babayev, M.S., Shpyrko, S.G., Mukhtarova, Kh.Z. (2019). Geothermal conditions of hydrocarbon prospects of Meso-Cenozoic formations in South Caspian Basin. *Geophysical Journal*, 41(5), 222-234. doi: 10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183638 [in Russian with English abstract]
- Glumov, I.F. et al. (Editors) (2004). Regional geology and oil and gas content of Caspian Sea. Moscow, Russia: Nedra [in Russian with English abstract]
- Golonka, J. (2007). Geodynamic evolution of the South Caspian Basin. In: Yilmaz, P.O. and Isaksen, G.H. (Eds.) Oil and gas of the Greater Caspian area. *AAPG Studies in Geology*, 55, 17-41. doi: 10.1306/E4FD36E9-1732-11D7-8645000102C1865D
- Green, T., Abdullayev, N., Hossack, J., Riley, G., Roberts, A. (2009). Sedimentation and subsidence in the South Caspian Basin, Azerbaijan. In: Brunet, M.-F., Wilmsen, M. and Granath, J. W. (Eds.) South Caspian to Central Iran Basins. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 312, 241-260, doi: 10.1144/SP312.12.
- Guliyev, I.S., Feyzullayev, A.A., Huseynov, D.A. (2001a). Carbon isotopic composition of the hydrocarbon fluids of the South Caspian megadepression. *Geochemistry International*, 39(3), 237-243.
- Guliyev, I.S., Feizulayev, A.A., Huseynov, D.A. (2001b). Isotope geochemistry of oils from fields and mud volcanoes in the South Caspian Basin, Azerbaijan. *Petroleum Geoscience*, 7, 201-209. doi: 10.1144/petgeo.7.2.201
- Guliyev, I.S., Mamedov, P.Z., Feyzullayev, A.A. et al. (2003). Hydrocarbon systems of the South Caspian Basin. Baku, Azerbaijan: Nafta-Press.
- Guliyev, I.S., Fedorov, D.L., Kulakov, S.I. (2009). Hydrocarbon potential of the Caspian region. Baku, Azerbaijan: Nafta-Press.
- Guliyev, I.S., Bagirov, E.S. (2016). Role of seal rocks in the formation of hydrocarbon deposits in South Caspian basin and prognosis of accumulations in the offshore Absheron section (part II). *Azerbaijan Oil Industry Journal*, 7-8, 3-10. [in Russian with English abstract]
- Guliyev, I.S., Kerimov, V.Yu., Osipov, A.V., Mustaev, R.N. (2017). Generation and accumulation of hydrocarbons at great depths under the Earth's Crust. *SOCAR Proceedings*, 1, 004-016. [in Russian with English abstract]
- Gürgey, K. (2003). Correlation, alteration, and origin of hydrocarbons in the GCA, Bahar, and Gum Adasi fields, western South Caspian Basin: geochemical and multivariate statistical assessments. *Mar. Petrol. Geol.*, 20(10), 1119-1139. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2003.10.002.
- Huseynov, D., Guliyev, I. (2004). Mud volcanic natural phenomena in the South Caspian Basin: geology, fluid dynamics and environmental impact. *Environmental Geology*, 46, 1012-1023. doi: 10.1007/s00254-004-1088-y.
- Inan, S., Yalcin, N., Guliev, I., Kuliev, K., Feizullaev, A. (1997). Deep petroleum occurrences in the Lower Kura Depression, South Caspian Basin, Azerbaijan: an organic geochemical and basin modelling study. *Mar. Petrol Geol.*, 14(7/8), 731-762. doi: 10.1016/S0264-8172(97)00058-5.
- Javanshir, R., Riley, G., Duppenbecker, S., Abdullayev, N. (2015). Validation of lateral fluid flow in an overpressured sand-shale sequence during development of Azeri-Chirag-Gunashli oil field and Shah Deniz gas field: South Caspian Basin, Azerbaijan. *Mar. Petrol Geol.*, 59, 593-610. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2014.07.019.
- Katz, K.J., Richards, D., Long, D., Lawrence, W. (2000). A new look at the components of the petroleum system of the South Caspian Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 28(4), 161-182. doi: 10.1016/S0920-4105(00)00076-0.
- Kauerauf, A., Hantschel, T. (2009). Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. Berlin-Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-540-72318-9.
- Kerimov, V.Yu., Rachinskiy, M.Z., Kolushkina, O.V. (2010). Conditions of oil and gas generation in South-Caspian basin. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2/259, 29-38. [in Russian with English abstract]
- Kerimov, V.Yu. et al. (Eds.). (2015). Prognosing hydrocarbon potential in regions of complicated deep structure. Moscow, Russia: Nedra. ISBN: 978-5-8365-0430-4.
- Khain, V.E. (2001). Tectonics of continents and oceans (year 2000). Moscow: Nauchnyj Mir [in Russian with English abstract]
- Khain, V.E. (2005). The problem of the origin and the age of the South Caspian Basin and its possible solutions. *Geotectonics*, 39(1), 34-38.

Khain, V.E. et al. (Eds.). (2009). Tectonics of the southern margins of East-European platform (Explanatory note to the tectonic map of Black Sea and Caspian region, Scale 1:2 500 000). Krasnodar [in Russian with English abstract].
Klett, T.R., Schenk, C.J., Charpentier, R.R., Gautier, D.L., Brownfield, M.E., Pittman, J.K., Cook, T.A., Tennyson, M.E. (2010). Assessment of undiscovered oil and gas resources of the North Caspian Basin, Middle Caspian Basin, North Ustyurt Basin, and South Caspian Basin Provinces, Caspian Sea Area. *U.S. Geological Survey Fact Sheet* 2010–3094, 4 p.

Makhous, M., Galushkin, Yu.I. (2005). Basin analysis and modeling of the burial, thermal and maturation histories in sedimentary basins. Paris: Editions Technip. ISBN 2-7108-0846-3.

Mustayev, R.N. (2013). Conditions for formation and hydrocarbon potential prognosis at the western flange of the South Caspian depression. *Extended abstract ... Doctor's thesis in geology and mineralogy*. Moscow. [in Russian with English abstract]

Piip, V.B., Rodnikov, A.G. Buvaev, N.A. (2012). The Deep Structure of the Lithosphere along the Caucasus–South Caspian Basin–Apsheron Threshold–Middle–Caspian Basin–Turan Plate Seismic Profile. *Moscow University Geology Bulletin*, 67(5), 314–319. [in Russian with English abstract]

Rachinskiy, M.Z., Kerimov, V.Yu. (2015). Fluid Dynamics of Oil and Gas Reservoirs. Scrivener Publishing LLC. doi: 10.1002/9781118999004.

Smith-Rouch, L.S. (2006). Oligocene–Miocene Maykop/Diatom Total Petroleum System of the South Caspian Basin Province, Azerbaijan, Iran, and Turkmenistan. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2201-I, 1–27.

Sweeney, J., Burnham, A. (1990). Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics (1). *Am. Assoc. Petr. Geol. B.*, 74(10), 1559–1570.

Tagiyev, M.F., Nadirov, R.S., Bagirov, E.B., Lerche, I. (1997). Geohistory, thermal history and hydrocarbon generation history of the north-west South Caspian Basin. *Mar. Petrol. Geol.*, 14(4), 363–382. doi: 10.1016/S0264-8172(96)00053-0.

Tissot, B.P., Pelet, R., Ungerer, P. (1987). Thermal history of sedimentary basins, maturity indices and kinetics of oil and gas generation. *Am. Assoc. Petr. Geol. B.*, 71, 1445–1466.

Vincent, S.J., Davies, C.E., Richards, K., Aliyeva, E. (2010). Contrasting Pliocene fluvial depositional systems within the rapidly subsiding South Caspian Basin; a case study of the palaeo-Volga and palaeo-Kura river systems in the Surakhany Suite, Upper Productive Series, onshore Azerbaijan. *Mar. Petrol. Geol.*, 27(10), 2079–2106. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2010.09.007.

Welte, D., Hantschel, T., Wygrala, B., Weissenburger, K., Carruthers, D. (2000). Aspects of petroleum migration modelling. *J. Geochem. Explor.*, 69, 711–714. doi:10.1016/S0375-6742(00)00105-9.

Yusifov, M., Rabinowitz, P.D. (2004). Classification of mud volcanoes in the South Caspian Basin, offshore Azerbaijan. *Mar. Petrol. Geol.*, 21(8), 965–975. doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.06.002.

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(1), 181–211. doi: 10.1016/0040-1951(86)90197-6.

Надійшла до редколегії 29.09.19

K. Каграманов, канд. геол. наук,
E-mail: gngahramanov@gmail.com,
Державна Нафтова Компанія Азербайджанської Республіки (SOCAR), Баку, Азербайджан;
М. Бабаєв, канд. геол. наук,
E-mail: m.s.babayev@mail.ru;
Азербайджанський Державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан;
С. Шпирко, канд. фіз.-мат. наук,
E-mail: sshpyrko@gmail.com,
Відділення морської геології НАН України, Київ, Україна;
Х. Мухтарова, канд. геол. наук,
E-mail: mukhtarova.khuraman@mail.ru,
Азербайджанський Державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан

МОДЕЛЮВАННЯ ІСТОРІЇ ЗАНУРЕННЯ ТА МІГРАЦІЇ ВУГЛЕВОДНІВ У ПІВДЕННО-КАСПІЙСЬКІЙ ЗАПАДИНІ

Вивчаються механізми міграції та просторовий розподіл вуглеводневих скоплень вздовж регіонального сейсмопрофілю південно-західного простягання через Південно-Каспійську западину довжиною близько 1000 км. Виконано ретроспективне двовимірне геологічне моделювання занурення басейну та історії накопичення осадів з урахуванням супровідних термічних і катагенетичних перетворень органічної речовини, а також наступної міграції та акумуляції вуглеводнів.

Початок розкриття басейну з накопиченням істотної маси відкладів можна віднести до середнього мезозою (тріас або юра), а насичені вуглеводнями горизонти нині можуть бути на глибинах до 12 км. Насичення вуглеводнями пліоценової продуктивної товщі має епігенетичний (алохтонний) характер, що також підтверджується даними геохімічних досліджень грязьових вулканів та іншими фактами. Геохімічний вік, глибинність і ступінь переробки вуглеводнів указують на джерела їхньої генерації у мезозойських (газ) і палеоген-міоценових комплексах (нафта) за підпорядкованою участю нижніх горизонтів пліоценової продуктивної товщі. Переважною формою переміщення природних флюїдів є субвертикальна ін'єкційна міграція між ярусами пульсаційного характеру, причому для руху флюїду використовують площини розривів, зони тріщинуватості та розсуцільнення, контакти діапірів, канали грязьових вулканів, структурні та фаціальні незгідності тощо. Це дозволяє розраховувати на акумуляцію вуглеводнів промислового масштабу на надвисоких глибинах за умови наявності структур великого розміру, зіставних із відкритими гігантськими родовищами (Шах-Деніз, Азери-Чираг-Гюнешлі).

Ключові слова: міграція вуглеводнів, моделювання осадового басейна, ретроспективне моделювання, нафтогазоносність надвисоких глибин, PETROMOD.

K. Каграманов, канд. геол. наук,
E-mail: gngahramanov@gmail.com,
Государственная Нефтяная Компания Азербайджанской Республики (SOCAR), Баку, Азербайджан;
М. Бабаев, канд. геол. наук,
E-mail: m.s.babayev@mail.ru,
Азербайджанский Государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан;
С. Шпирко, канд. физ.-мат. наук,
E-mail: sshpyrko@gmail.com,
Отделение морской геологии НАН Украины, Киев, Украина;
Х. Мухтарова, канд. геол. наук,
E-mail: mukhtarova.khuraman@mail.ru,
Азербайджанский Государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОРИИ ПОГРУЖЕНИЯ И МИГРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ЮЖНО-КАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЕ

Изучаются механизмы миграции и пространственное распределение углеводородных скоплений вдоль регионального сейсмопрофиля юго-западного простирания через Южно-Каспийскую впадину длиной около 1000 км. Выполнено ретроспективное двумерное геологическое моделирование погружения бассейна и истории его осадкозаполнения с учетом сопутствующих термических и катагенетических преобразований органического вещества, а также последующей миграции и аккумуляции углеводородов.

Начало раскрытия бассейна с накоплением значительной массы отложений можно отнести к среднему мезозою (триас или юра), а углеводородонасыщенные горизонты в настоящее время могут находиться на глубинах до 12 км. Насыщение углеводородами пліоценовой продуктивной толщи носит эпигенетический (алохтонный) характер, что также подтверждается данными геохимических исследований грязевых вулканов и другими фактами. Геохимический возраст, глубинность и степень переработки углеводородов указывают на источники их генерации в мезозойских (газ) и в палеоген-миоценовых комплексах (нефть) с подчиненным участием нижних горизонтов пліоценовой продуктивной толщи. При перемещении флюидов преобладает субвертикальная инъекционная миграция между ярусами, носящая пульсационный характер и использующая для движения плоскости разрывов, зоны трещиноватости и разуплотнения, контакты диапиров, каналы грязевых вулканов, структурные и фаціальны несогласия. Это позволяет рассчитывать на аккумуляцию УВ промышленного масштаба на сверхвысоких глубинах при условии наличия структур большого размера, сопоставимых с открытыми крупными месторождениями (Шах-Деніз, Азери-Чираг-Гюнешлі).

Ключевые слова: миграция углеводородов, моделирование осадочного бассейна, ретроспективное моделирование, нефтегазоносность сверхвысоких глубин, PETROMOD.

УДК.549:553.684 (477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.13>O. Dubyna^{1,2}, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,

E-mail: dubyna_a@ukr.net;

S. Kryvdik², Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,

E-mail: kryvdik@ukr.net;

V. Belskyi², PhD (Geol.),

E-mail: belskyi_vm@ukr.net;

O. Vyshnevskiy², PhD (Geol.-Min.), Senior Researcher,

E-mail: vyshnevskiy@i.ua;

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

90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

²M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy

and Ore Formation of the NAS of Ukraine,

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

FEATURES OF BERILLIUM AND RARE METAL MINERALIZATION IN SYENITE OF THE PERGA DEPOSIT (UKRAINIAN SHIELD)

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

The results of the ore and accessory minerals study in the syenite of the Perga beryllium deposit are discussed. Phenakite and genthelvite are found among Be-bearing minerals. Genthelvite of this syenite, being compared to early published data on genthelvite of the Perga deposit, is distinguished by the highest ZnO content which is close to the theoretical maximum due to the alkaline nature of studied rock ($(Na + K)/Al = 1.09$). Genthelvite occurs as later mineral to phenakite or is formed by phenakite replacement at rising the alkalinity as a result of melt differentiation. Columbite with high-Mn content, Y-silicate (keiviite-(Y)?), rare-earth fluorocarbonate (bastnesite) are also found among other minerals of rare metals. The presence of fluorite and rare-earth fluorocarbonate in association with genthelvite or phenakite may indicate that Be and REE were transported in ore-bearing fluids as complex fluorine-carbonate compounds. Considering the geochemical characteristics of rocks (meta-aluminous, subalkaline and alkaline series, deep negative Eu-anomalies, low Sr, Ba, elevated – HFS elements) from the Sushcano-Perga region, enrichment of these rocks with rare metals and Be are related to intensive feldspar fractionation of the primary melts and due to alkaline oversaturation, volatile and rare metals (Be, Li, REE, Y, Nb, Ta) enrichment in the residual fractions of granitic or syenitic compositions. Postmagmatic alkaline solutions enriched in F and CO₂²⁻ promote of Be concentration in fluid phase with its following migration and crystallization as genthelvite.

Keywords: genthelvite, phenakite, subalkaline granites, alkaline syenites, columbite, Perga deposit, Ukrainian shield.

Problem statement. Minerals of the helvine series occur in rocks of different mineral composition and origin: helvine is more typical in skarns, granite – pegmatites, hydrothermal veins; danalite is mainly observed in skarns, (alkaline) granitoids and high-T metasomatites; genthelvite is associated with subalkaline and alkaline granites and syenitic rocks, alkaline pegmatites (Dunn, 1976).

The first publications about genthelvite find in siderophyllite greisen related to granites of the Sushcano-Perga area (SPA) are dated to the 60s of the last century (Gurvich et al., 1963). Despite the occurrence of genthelvite mineralization in SPA is known for a long time, however, there are no reliable explanations of the origin of ore-bearing rocks as well as processes resulted in formation of such specific beryllium mineralization.

Recent publications review. There are different concepts about possible origin of genthelvite-bearing rocks in SPA. Gurvich S.I. with co-authors (Gurvich et al., 1963) has described these rocks as altered and enriched in quartz (silicified syenites, which occur as small elongated or dike-like bodies in biotite granites. Based on the mineral composition – they include (%): 50–70 perthitic microcline, 10–30 albite, 10–15 quartz, 3–5 biotite and 2–3 magnetite – these rocks are interpreted to be microcline syenites similar to alkaline varieties. Superimposed hydrothermal-pneumatolithic alterations resulted in formation of quartz veins and silicified zones with associated genthelvite crystallization. Although the nature of such Be-enrichment of these fluids and Be concentration mainly in the genthelvite are still incompletely resolved problem.

In subsequent publications (Galetsky, 1966) the occurrence of genthelvite mineralization is mostly interpreted based on tectonic framework of the SPA that promote subalkaline granitoids formation and subsequent intensive auto- and metasomatic alterations with related rare metal mineralization. According to L.S. Galetskiy, Be mineralization itself should not be related to the specific syenitic (or granitic) rocks, but it occurs as confined to zones of intense metasomatic alteration formed in host granitoids by changing

their composition to quartz-K-feldspar, quartz-albite-K-feldspar, quartz-K-feldspar-albite, mica-K-feldspar and quartz-siderophyllite metasomatites. Increased concentrations of Ta, Sn, W, Ag, Li, Rb, Cs, REE, Y, Fe, Zn, Mo, Pb in beryllium-enriched rocks is interpreted to be a combined occurrence of two mineral associations: Sn-W-Be and polymetallic (Galetsky, 1966). According to this author, concentration of Be in genthelvite and formation of ore concentration of such unusual mineral association are treated to be a result of high enrichment of ore-bearing fluids in S, Si, as well as Zn and Fe, and depletion in Al. Nevertheless, the nature of such specific solutions and mineral association as well as the relation between genthelvite and phenakite (described by L.S. Galetskiy for the first time) and possible sequence of their appearance still remain uncertain.

In later publications (Bezpal'ko, 1970) the genthelvite-bearing rocks were called as "perthosites" and considered as metasomatic rocks (perthositic association), in spite of the fact that "perthosite" (according to petrographic code) is used for description of leucocratic variety of alkali feldspar syenite that consists almost entirely of perthite. Thus this term might be appropriate only in case of magmatic origin of these rocks. So other researchers termed these rocks as K-feldspar metasomatites based on their metasomatic origin.

According to V.T. Shatska (Ginzburg et al., 1975) review that is based mainly on the results of V.M. Gorbunov, S.V. Metalidy, R.A. Slysh observations the ore sites are confined to the tectonic dislocation zones and adjacent fractures formed in quartz-feldspar granitoids (gneiss-like "granites"). Here granites are altered with formation of metasomatites of various compositions – quartz-biotite-microcline to quartz-siderophyllite.

Article aims. The authors hope that petrographic and mineralogical studies of ore-bearing rocks of the Perga beryllium deposit will promote clearer understanding of the nature of ore mineralization and help to distinguish the peculiarities of the geological processes that resulted in Be-concentration as quite rare mineral species.

Methods. Genthelvitite was analyzed using a JCSA-733 (JEOL) electron microprobe, equipped with three vertical wavelength dispersive spectrometers, in the Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, NAS of Ukraine. Analytical conditions were as follows: beam acceleration voltage of 15 kV, beam current 20 nA, and beam diameter of 2 μm ; counting times per analysis of 30 s on peak positions and 10 s on two background positions. Chemical composition of rare metal minerals was determined using a JSM-6700F field emission scanning electron microscope equipped with a JED-2300 energy-dispersive spectrometer (JEOL) in the Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, NAS of Ukraine. Operating conditions were as follows: 20 kV accelerating voltage, 1,0 nA beam current, 2 μm beam size and a counting time of 90 seconds for one analysis. Pure metals, synthetic compounds and natural minerals were used for calibration. Raw counts were corrected for matrix effects with the ZAF algorithm implemented by JEOL.

Petrography. Set of samples collected from the waste dumps of the Perga mine is studied. Petrographic descriptions have shown the most interesting rock according to their mineralogy (almost completely consist of perthite and minor albite, lattice microcline and quartz (10–15 %)) and chemical composition (SiO_2 63,99, TiO_2 0,11, Al_2O_3 16,64, Fe_2O_3 1,07, FeO 1,86, MnO 0,04, MgO 0,38, CaO 0,71, Na_2O 5,23, K_2O 8,87, P_2O_5 0,04, Total 99,18) can be classified as quartz alkali-feldspar syenite. Geochemical investigation have shown the presence (in ppm): 5000 Ba, 200 La, 250 Ce, 100 Nb, 450 Zr, 500 Y, 60 La, 200 Ce, 100 Th. Large perthite grains which are found in the most samples are characterized by simple twinning that together with perthite have a "fir-like" shapes under crossed links (Carlsbad twinning), which are more typical for orthoclase. According to (Menert, 1971), such exsolution of primary K-Na-feldspars can occur at solvus temperatures (660–715°C), while crosshatched twinning of microcline formed as a result of rearrangement of earlier monoclinic orthoclase, at temperature not lower than 500°C. Based on the results of homogenization of gas-liquid inclusions ore metasomatites (with genthelvitite and willemite) are formed at 400–500°C.

The amount of perthite intergrowths (30–50 %) in porphyry-like feldspar indicates high-temperature crystallization environment of this rock. It is widely known that at low temperature conditions albite and microcline that occur in hydrothermal rocks and low-temperature metasomatites are commonly crystallized as separate grains. Microcline grains with typical microcline twinning are smaller in size relative to grains of perthitic feldspar and can be found in crushing zones in association with fine grained quartz, that can indicate their formation at later stages. Besides rock-forming minerals and above mentioned genthelvitite plus phenakite such ore and accessory minerals as columbite, monazite, rare earth carbonate, zircon,

magnetite, tungstenite (series tungstenite-gubnerite), as well as undiagnosed Y-silicate (keiviite-(Y)?) are found in this sample.

The studied rock is slightly oversaturated in alkalis and has increased agpaitic index ($(\text{Na}+\text{K})/\text{Al} = 1,09$), although the alkali minerals have not been found. At the same time early publications (Ginzburg et al., 1975; Myckevych et al., 1986) have presented analytical data on peralkaline "feldspar metasomatites" ($(\text{Na}+\text{K})/\text{Al} = 0,98\text{--}1,10$) found in SPA. Agpaitic nature of this rock might be a result of partial entering of Fe^{+3} into tetrahedral position of feldspar with associated decreasing in aluminum and resultant oversaturation in alkalis. Based on the obtained data the studied syenite might be considered as rock variety very similar to leucocratic syenites of the Yastrubetsky massif, which is also situated among granites of SPA. It should be noted that these syenites are also characterized by increased Be (up to 33 ppm in syenites and only up to 20 ppm in the Perga granites) (Dubyna et al., 2014), as well as by Zr, REE, Nb, Y. Data presented in this article taken together with results observations made by N.A. Bezpal'ko, make it possible to suppose that "perthosite" occurs as veins and might represent the dyke swarm or vein facies of the Yastrubetsky massif or syenites that are very similar to them.

Chemical composition of genthelvitite. Earlier investigations carried out in SPA distinguished several generations of genthelvitite from three (Ginzburg et al., 1975) to four (Galetsky, 1966) and up to seven (Metalydy and Nechaev, 1983). According to the early published data, genthelvitite crystals commonly show zonal structure with various zones of different chemical composition (Tabl. 1). It is possible that these zones might be erroneously interpreted by early researchers as separate generations. In one of publication (Remeshilo et al., 1977) has discussed zonal crystal of genthelvitite with up to 13 zones distinguished based on rather variable content of Zn and Fe (but without significant variations in Mn. Accordingly to (Metalid and Nechaev, 1983), have made an assumption about higher Zn and lower Fe contents in late generations but without presenting any detailed analytical results. The highest content of ZnO (53,3 %) was determined in the second generation of this mineral.

By early investigation genthelvitite is crystallized in different rock varieties of SPA: syenites (perthosites), greisens and silicified varieties of these rocks. Among investigated samples leucocratic perthitic syenites characterized by the highest content of genthelvitite. Our own results and their comparison with data of previous publication indicate that these varieties of genthelvitite show maximum enrichment in zinc (ZnO up to 55,6 %) (Fig. 1). Separate genthelvitite generation is not possible to be distinguished however in some cores of zonal crystals higher Zn contents are fixed in comparison to their rims.

Table 1

Chemical composition of genthelvitite from syenites of the Perga deposit

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO_2	28,94	29,68	29,49	28,98	30,98	31,00	31,06	31,13	31,03	31,01	30,95	30,62	30,67	30,96	31,02	31,02
BeO_{calc}	12,74	12,66	12,45	12,43	12,89	12,90	12,92	12,95	12,91	12,90	12,88	12,74	12,76	12,88	12,91	12,91
ZnO	55,64	52,29	52,18	53,02	53,37	52,84	45,46	45,54	45,17	51,79	49,31	51,93	52,61	51,94	50,27	48,25
FeO	1,47	1,45	1,92	1,84	0,83	0,83	6,63	6,92	7,46	3,15	4,46	2,11	2,15	1,38	4,29	4,66
MnO	0,23	-	0,25	0,03	1,43	1,93	2,72	2,46	2,11	0,56	1,33	0,84	0,29	2,11	0,78	2,17
S	5,44	5,40	5,32	5,31	5,50	5,51	5,52	5,53	5,51	5,51	5,50	5,44	5,45	5,50	5,51	5,51
Total	104,46	102,96	101,61	101,60	105,00	105,00	104,30	104,53	104,19	104,91	104,42	103,67	103,94	104,76	104,78	104,51
-1/2S	101,74	100,26	98,95	98,95	102,25	102,24	101,55	101,77	101,44	102,16	101,68	100,95	101,21	102,01	102,02	101,76

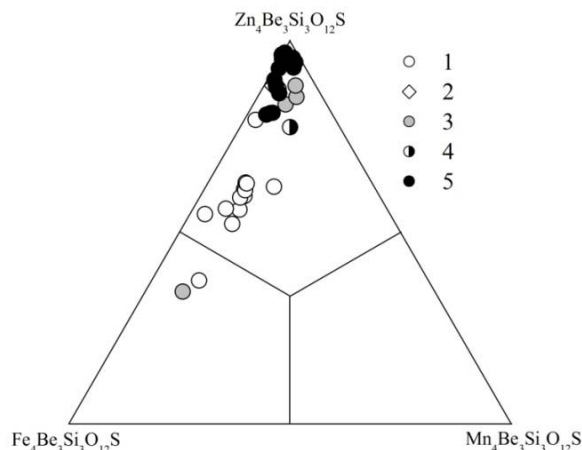


Fig. 1. Composition of genthelvite of the Perga deposit are plotted on triangle diagram of helvite-danalite-genthelvite coordinates. Legend:

1 – (Remeshilo et al., 1977); 2 – (Metalid, Nechaev, 1983);
3 – (Ginzburg et al., 1977); 4 – (Galetsky, 1966); 5 – author's data published in this paper (Tabl. 1)

In our opinion, another feature of the beryllium-bearing rocks of SPA, which is still obscure, concerns the interrelation between two beryllium minerals – genthelvite (abundant) and phenakite. Based on early publications about SPA it is widely known that phenakite is confined to the silicified zones of gneiss-like granites, greisens and syenites (Ginzburg et al., 1975, 1977).

According to these investigations phenakite commonly was found at the peripheral part of genthelvite enriched areas, and phenakite being crystallized later than genthelvite at lower temperature (180–250°C) during of metasomatic stage. As one of main of mentioned arguments is presence of phenakite on the margin of genthelvite grains. However, it should be mentioned that association of phenakite and helvite series minerals is commonly observed in metaluminous or peralkaline rocks, so alkaline Be-silicates is more typical for alkaline rocks unsaturated with silica. Phenakite is also observed (oral evidence from one of author of this paper) in Perga porphyry granite (biotite and oligoclase) i.e. without any presence of alkaline minerals.

The results of petrographic and mineralogical studies made on quartz-alkali-feldspar syenite do not prove early concept about crystallization sequence of beryllium minerals, or, at least, indicate the ambiguity of the supposed relation between genthelvite and phenakite. In addition, the above mentioned low-temperature conditions of phenakite crystallization disagree with experimental data on phenakite

and bertrandite stability at moderate pressures (0,5–3,5 kbar) and temperatures (up to ~ 350°C) where bertrandite is more stable in comparison with phenakite (Hsu, 1983).

In the studied samples (thin and polished sections) single crystals of genthelvite and phenakite are commonly found. Phenakite is generally larger in size and shows presence of fissures filled with iron phase (hematite?) and rarely rare-earth-fluorocarbonate. In thin sections, large phenakite crystals (Fig. 2) are common. Sometimes in cracks and on the edges of these crystals fine-grained (<0.1 mm) and tetrahedral (triangular in shape) crystals of genthelvite are developed. In addition, core parts of large triangular genthelvite crystals (by transparent light) are filled with brownish aggregate where small relics of phenakite are also discovered. Fine-grained (< 10 µm) genthelvite rim around smaller (~ 100 µm) phenakite crystals are found but they are more rare. It is possible to suppose that phenakite is earlier mineral, at least in the investigated syenite. At alkalinity increasing of granitoid melt or ore-bearing solutions phenakite became unstable and was replaced by genthelvite.

Other rare metal minerals. As mentioned above, granitoids and studied syenite sampled in the Perga mine are characterized by increased contents of LIL and HFS elements too. Among minerals that contain these elements columbite, ferropseudobrookite, monazite, bastnäsite and Y-silicate are studied (Tabl. 2).

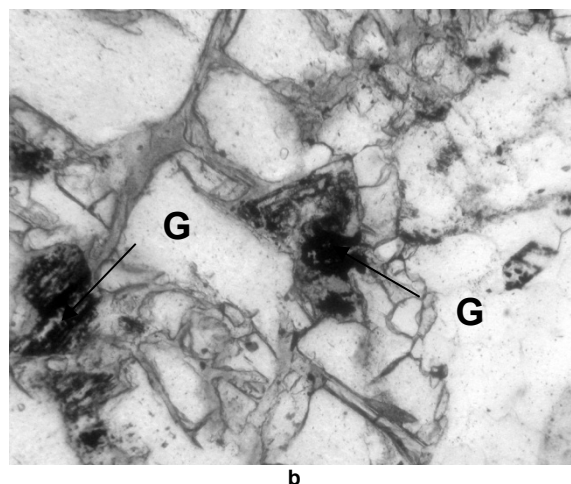
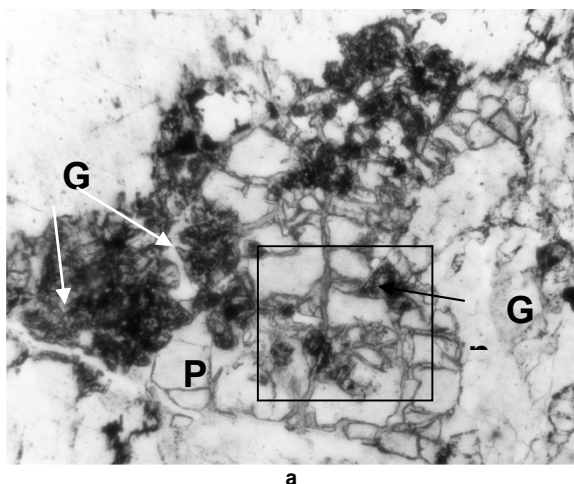


Fig. 2. a – the large (~3 mm) grain of phenakite (Phe) with small (usually <100 µm, commonly triangle in shape) grains of genthelvite (Gn) (magnification 40×) in fractures; b – genthelvite grains of (magnified part of A) image, magnification 100×). Photos in transparent light

Table 2

Chemical composition of rare metal minerals from syenites of the Perga deposit

	1	2	3	4	5	6	7	8*	9	10*	11*	12	13	14	15*	16*
	Columbite						Ferropseudobrookite			Ilmenorutile		Monazite	Keiviite-(Y)		REE-F-carbonate	
SiO ₂	2,06	1,63	2,58				2,12			3,22	4,17	1,69	40,98	39,12	2,49	0,34
TiO ₂	3,65	2,38	2,93	3,09	2,44	2,18	69,78	58,27	70,26	65,69	67,22				0,13	0,01
FeO	15,21	13,75	14,34	15,41	16,64	13,71	26,9	26,03	27,25	25,72	19,12		2,34	3,05	18,1	1,34
MnO	5,55	6,03	5,88	3,89	2,59	6,22	1,2	12,63	2,49	1,04	0,2				0,05	0,04
CaO													5,01	4,46	2,05	0,67
F															2,67	11,02
Nb ₂ O ₅	73,52	76,2	74,27	72,41	75,94	76,33					2,99					
Ta ₂ O ₅				5,21	2,39	1,56										
P ₂ O ₅												29,75			0,01	
Y ₂ O ₃													51,67	53,38	14,13	1,45
La ₂ O ₃												16,06			4,14	19,65
Ce ₂ O ₃												39,59			8,54	28,8
Nd ₂ O ₃															4,27	9,35
REE ₂ O ₃ ^{tot}															32,41	62,11
ThO ₂												12,92			0,54	0,25
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	63,05	78,15

* Following elements are also determined in presented analysis are: 8 – 3,07 ZnO; 10 – 4,34 ZrO₂; 11 – 6,3 ZrO₂; 15 – 3,02 Al₂O₃; 0,17 MgO; 0,66 SrO; 0,09 Na₂O; 0,6 PbO₂; 0,05 UO₂; 0,91 Pr₂O₃; 0,28 Eu₂O₃; 0,14 Sm₂O₃; 16 – 0,89 SrO; 2,77 Pr₂O₃; 0,73 Eu₂O₃; 0,61 Sm₂O₃; 0,2 Tb₂O₃.

1–3 – analysis from different part of single grain; 4, 5 – fine-grained (about 60 μm) irregularly shaped columbite; 6 – similar to previous neighboring grain; 7–10 – analysis from different part of single elongated (about 0.6 mm) grain; 11 – single grain in association with columbite; 12 – core (unaltered) part of small (about 140 μm) elongated grain; 13, 14 – the most large (up to 15 μm) grain in fine-grained segregation around magnetite; 15 – small (up to 50 μm) inclusion in core part of genthelvite; 16 – single grain (up to 250 μm) next to zircon.

Columbite occurs as small (0,1 mm) crystals of irregular shape with corroded faces. Locally at grain edges a thin rim of secondary ferruginous phase (hematite?) is formed, though some intergrowths between columbite, isometric magnetite (?) and ilmenorutile are also found. The contents and ratio of main components are consistent with columbite analyses that were published earlier (Buchinskaya and Nechaev, 1992) and point out to increased of Mn content. The similar Mn-rich columbites are described by these authors in the aegirine-biotite and siderophyllite granites of SPA.

Ferropseudobrookite forms elongated (0.6×0.15 mm) crystal which sometimes shows presence of idiomorphic faces. On back-scattered electron image, crystal looks like homogeneous grains, with one single point showing significant increase of MnO and ZnO (Tabl. 2, an. 8).

Keiviite-(Y) (?) is a secondary mineral which is most commonly observed in cracks of quartz and fluorite from "amazonite" pegmatite's. The minerals that might be preliminarily diagnosed (by the ratios of main elements (Y:Si = 1:1)) as keiviite-(Y) occur only as fine aggregates (<5 μm) that surround large magnetite grain. These aggregates include larger grains (up to 15 μm) of irregular shape, among which one single grain was analyzed. But more detailed investigation is needed, because in analyzed grain only Y is presented, whereas typical keiviite-(Y) should also be enriched in HREE.

Bastnäsite might be found as small inclusions in genthelvite, in cracks of phenakite and single small grains. The presence of rare-earth-fluorocarbonate and obvious secondary (or late) nature of their occurrence as confined to beryllium minerals as well as constant presence of fluorite prove the conclusions of experimental studies. These results testify that the main agents of postmagmatic or hydrothermal fluids, which are responsible for the transfer and concentration of Be, are not purely fluorine but F-CO₃²⁻ is in composition that is more typical for alkaline conditions.

Conclusions. It is known that subalkaline and peralkaline magmas can concentrate Be in different rocks ranging in composition from subalkaline biotite granites and syenites to riebeckite-aegirine varieties. As a rule, magmatic rocks similar to alkaline granites and quartz syenites show rather high Be contents (Khaldzan-Buregtey, Mongolia),

although ore mineralization are mainly associated with alkaline pegmatites (Strange Lake, Thor Lake, Canada) formed at the final stages of granitoid melts differentiation.

According to published data (Esypchuk et al., 1993; Dubyna and Kryvdik, 2014), chondrite-normalized REE patterns of the Perga granites and syenites of the Yastrubetsky massif are characterized by large negative Eu-anomalies (Eu/Eu* = 0,05–0,11) and significant enrichment in HREE ((La/Yb)_n = 0,3–20). Such REE distribution patterns and other geochemical features (low Sr and Ba, high HFSE) give us a reason to assert that at least the alkaline varieties of the Perga granites and associated syenites, i.e. syenites of the Yastrubetsky massif, are formed as a result of intensive crystalline fractionation of granitic or syenitic melts. Apparently, these processes of differentiation could be responsible for formation of residual melts enriched in volatile and alkaline elements with associated increasing of fluorine and rare metal (Be, Li, REE, Y, Nb, Ta) contents.

Therefore, the main reason of increased concentration of Be in SPA is likely to be explained by geochemical characteristics of highly differentiated melts, namely, reduced in aluminum content (metalluminous) and increased alkalinity. It can be also proved by the fact of enrichment in Be and rising of Zr, Nb, REE concentrations, which is typical for the similar types of alkaline or subalkaline magmas. In addition, low or reduced aluminum content and high alkalinity can promote formation of phenakite instead of beryl that is more typical for peraluminous granites. At entering of these melts into hypabyssal environment and their subsequent crystallization, volatile enriched solutions could be separated, that adduce to increasing of Be solubility and its accumulation in the fluid phase. Low activity of SiO₂ in the syenite rocks could also enhance this effect. The presence of fluids enriched in Be and other rare metals, that are genetically associated with subalkaline or alkaline granites and syenites, high oxygen fugacity and low sulfur content, are favorable for transportation and subsequent concentration of Be in genthelvite. Genthelvite can be crystallized together with phenakite or by its replacement. At the same time, genthelvite of alkaline syenites is characterized by the ZnO content that is very similar to the

theoretically calculated composition, which is related with alkaline conditions of this mineral crystallization.

In our opinion, significant Zn enrichment of genthelvite found in studied sample is caused by its elevated alkalinity. As is known, genthelvite is the member of sodalite-danalite series, which is characterized by entering of S (or SO_4^{2-}) in additional anions, that is caused, on the one hand, by reduced sulfur and elevated oxygen fugacity, and on the other hand, by increased alkalinity of the melt where Fe and Mn comprise oxides and other silicates (Burt, 1988). Therefore, at crystallization of alkaline melts occurrence of hydrothermal and sulfide mineralization is not typical, and S, SO_4^{2-} and H_2O , together with Na, enter into silicate minerals (sodalite, cancrinite, haüyne, nosean).

Experimentally studied relation between FeO and ZnO solubility and pH of solution is also indicates that in range of pH from 9 to 11, their solubility is practically the same. At these condition Be and Zn migrate as similar complexes: $\text{Be}(\text{OH})_2$ and $\text{Zn}(\text{OH})_2$, $\text{Be}(\text{OH})_3^-$ and $\text{Zn}(\text{OH})_3^-$, which determines their occurrence in the same minerals (Khodakovskiy, 1975). In addition, the geochemical feature of Be is formation of stable complexes with fluorine ($[\text{BeF}_4]^{2-}$, $[\text{BeF}_3]^{2-}$, $[\text{BeF}_2]$, $[\text{BeF}]^+$), which prevail at low pH (2–5), while mixed F-CO_3^{2-} complexes (such as BeCO_3F^-) are predominant at higher pH (5–7) (Wood, 1992). According to experimental data (Kogarko et al., 1968), the fluorine separation in the fluid phase rise with increased acidity of the silicate melt and sharply decreases with increasing alkalinity. Therefore, in agpaite melts, F is not separated into gas phase at all, subsequently silicate melt gradually passes into the fluid-melt from which pegmatites with various minerals (including soluble in water NaF, sodium phosphates, soda and another rare earth minerals) are crystallized. These pegmatites might be treated to certain extent as similar to coarse-grained "perthosite".

Such crystallization enriched in Zn (and Mn) minerals might be found in highly differentiated (residual) melts represented by alkaline rocks. For example, Zn-kupletskite (up to 7,86 % ZnO) and hendricksite (21,5–25,8 % ZnO) were discovered in agpaite phonolites of the Oktyabrsky massif (Azov area), and high-Mn (up to 8,7 % MnO) amphibole and biotite (up to 3,52 ZnO and up to 14,3 % MnO) are also known in dike aegirine microphoyaites of this massif.

Possible influence of hydrothermal processes on the ore-ability of Be deposits that are associated with granite intrusions is still controversial, because sometimes both primary magmatic (Miller, 1996) and hydrothermal enrichments (Salvi and Williams-Jones, 1996) are treated to be important even for the same deposits. The reviews of published data show in spite of high Be content in pegmatoid alkaline rocks, the highest Be concentrations are still associated with later hydrothermal processes. Based on the type of mineralization of the beryllium-bearing rocks of SPA they are quite similar to fluorite-phenakite-helvite mineralization of the Verhnee Espe district (Kazakhstan), which occurs at the marginal zones of hydrothermally altered porphyry alkaline (riebeckite) granites.

Список використаних джерел

- Безпалько, Н.А. (1970). Петрологія і акцесорні мінерали гранітів та метасоматитів Північної Волині. Київ: Наукова думка.
- Бучинская, К.М., Нечаев, С.В. (1994). Тантал-ниобиевая минерализация Пержанского рудного узла (Украинский щит). *Минералогический журнал*, 1, 15–29.
- Галецкий, Л.С. (1966). О необычном парагенезисе гентельвина и касситерита. *Минералогический сборник Львовского у-та*, 20, 46–52.
- Гинзбург, А.И., Заболотная, Н.П., Куприянова, И.И., Новикова, М.И., Шацкая, В.Т., Шпанов, Е.П., Шурига, Т.Н., Гетманская, Т.И. (1975). Генетические типы гидротермальных месторождений бериллия. Москва: Недра.
- Гинзбург, А.И., Заболотная, Н.П., Куприянова, И.И., Новикова, М.И., Шацкая, В.Т., Шпанов, Е.П. (1977). Закономерности формирования гидротермальных месторождений бериллия. Москва: Недра.

- Гурвич, С.И., Зубко, Л.Б., Галецкий, Л.С. (1963). Генгельвин из окварцованных сиенитов. *Доклады АН СССР*, 5, 1123–1124.
- Дубина, О.В., Кривдик, С.Г. (2014). Геохімічні та петрологічні особливості лужних гранітоїдів Українського щита *Геологічний журнал*, 3, 83–94.
- Есипчук, К.Е., Орс, В.И., Щербakov, И.Б. и др. (1993). Гранитоиды Украинского щита. Петрохимия, геохимия, рудоносность. Киев: Наукова думка.
- Когарко, Л.Н. (1977). Проблема генезиса агапитовых магм. Москва: Наука.
- Менерт, К.Р. (1971). Мигматиты и происхождение гранитов. Москва: Мир.
- Металиды, С.В., Нечаев, С.В. (1983). Суцано-Пержанская зона (геология, минералогия, рудоносность). Киев: Наукова думка.
- Мицкевич, Б.Ф., Безпалько, Н.А., Егоров, О.С. и др. (1986). Редкие элементы Украинского щита. Киев: Наукова думка.
- Ремешило, Б.Г., Вынар, О.Н., Дручок, Л.П., Самойлович, Л.Г., Слыш, Р.А. (1977). К условиям формирования зональных кристаллов гентельвина. *Тезисы докл. респ. симпозиума "Минералогические критерии поисков редких металлов в пределах Украинского щита"*. Киев: Наукова думка.
- Ходаковский, И.Л. (1975). Исследования в области термодинамики водных растворов при высоких температурах и давлениях. *Автореф. дисс. ... д-ра геол. наук*. Москва.
- Шарыгин, В.В., Кривдик, С.Г., Поспелова, Л.Н., Дубина, А.В. (2009). Зн-куплетскит и хендриксит в агапитовых фonoлитах Октябрьского массива, Приазовье, Украина. *Докл. АН РАН*, 6, 810–815.
- Barton, M.D., Young, S. (2002). Non-pegmatitic Deposits of Beryllium: Mineralogy, Geology, Phase Equilibria and Origin. In Beryllium: Mineralogy, Petrology, and Geochemistry. Ed. by E.S. Grew, de Gruyter. University of Maine.
- Burt, D.M. (1988). Stability of genthelvite, $\text{Zn}_2(\text{BeSiO}_4)_3\text{S}$: an exercise in chalcopyhility using exchange operators. *American Mineralogist*, 73, 1384–1394.
- Dubyna, A.V., Kryvdik, S. G., Sharygin, V.V. (2014). Geochemistry of alkali and nepheline syenites of the Ukrainian Shield: ICP-MS Data. *Geochemistry International*, 842–856. <https://doi.org/10.1134/S0016702914080023>
- Dunn, P.J. (1976). Genthelvite and the helvine group. *Mineralogical Magazine*, 40, 627–636.
- Hsu, L.C. (1983). Some phase relationships in the system $\text{BeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ with comments on effects of HF. *Memoir of the Geological Society of China*, 5, 33–46.
- Miller, R.R. (1996) Structural and textural evolution of the Strange Lake peralkaline rare-element (NYF) granitic pegmatite, Quebec-Labrador. *Canadian Mineralogist*, 34, 349–371.
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W. (1987). A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95, 407–419.
- Wood, S.A. (1992). Theoretical prediction of speciation and solubility of beryllium in hydrothermal solution to 300°C at saturated vapor pressure: application to bertrandite/phenakite deposits. *Ore Geology Reviews*, 7, 249–278.
- Salvi, S., Williams-Jones, A.E. (1996). The role of hydrothermal processes in concentrating high-field strength elements in the Strange Lake peralkaline complex, northeastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1917–1932.

Reference

- Bezpal'ko, N.A. (1970). Petrology and accessory minerals of granites and metasomatites of Northern Volhynia. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian]
- Buchinskaya, K.M., Nechaev, S.V. (1994). Tantalum-niobium mineralization of the Perzhansky ore cluster (Ukrainian shield). *Mineralogical journal*, 1, 15–29. [in Russian]
- Galets'kiy, L.S. (1966). The unusual paragenesis of gentelvine and cassiterite. *Mineralogical digest of Lviv University*, 20, 46–52. [in Russian]
- Ginzburg, A.I., Zabolotnaya, N.P., Kupriyanova, I.I., Novikova, M.I., Shackaya, V.T., Shpanov, E.P., Shuriga, T.N., Getmanskaya, T.I. (1975). Genetic types of beryllium hydrothermal deposits. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Ginzburg, A.I., Zabolotnaya, N.P., Kupriyanova, I.I., Novikova, M.I., Shackaya, V.T., Shpanov, E.P. (1977). Regularity of beryllium hydrothermal deposits formation. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Gurvich, S.I., Zubko, L.B., Galets'kiy, L.S. (1963). Gengelvine from silicified syenites. *Report ASUSSR*, 5, 1123–1124. [in Russian]
- Dubyna, O.V., Kryvdik, S.G. (2014). Geochemical and petrological features of the alkaline granites of the Ukrainian Shield. *Geological journal*, 3, 83–94. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2014.3.138807> [in Ukrainian]
- Dubyna, A.V., Kryvdik, S. G., Sharygin, V.V. (2014). Geochemistry of alkali and nepheline syenites of the Ukrainian Shield: ICP-MS Data. *Geochemistry International*, 842–856. <https://doi.org/10.1134/S0016702914080023>
- Esyphchuk, K.E., Orsa, V.I., Sherbakov, I.B. et al. (1993). Granitoids of the Ukrainian shield. Petrochemistry, geochemistry, ore potential. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian]
- Kogarko, L.N. (1977). Problem of agpaite magma genesis. Moscow: Nauka. [in Russian]
- Mehnert, K.R. (1971). Migmatites and the origin of granitic rocks. Moscow: Mir. [in Russian]
- Metalydy, S.V., Nechaev, S.V. (1983). Sushchano-Perga region (geology, mineralogy, ore potential). Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Myckevych, B.F., Bezpal'ko, N.A., Egorov, O.S. et al. (1986). Rare elements of the Ukrainian Shield. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Remeshylo, B.G., Vynar, O.N., Druchok, L.P., Samoylovych, L.G., Slysh, R.A. (1977). Conditions of zonal crystals of genthelvite formation. *Abstract in "Mineralogical criteria for rare metals prospecting in the Ukrainian shield"*. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Hodakovskiy, I.L. (1975). Research of the aqueous solutions thermodynamics at high temperatures and pressures. *Extended abstract ... Doctor's thesis*. Moscow. [in Russian]

Sharygin, V.V., Krivdik, S.G., Pospelova, L.N., Dubina, A.V. (2009). Zn-Kupletskite and Hendricksite in the Apatitic Phonolites of the Oktyabrskii Massif, Azov Region, Ukraine. *Doklady Earth Sciences*, 3, 499-504. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09030349> [in Russian]

Barton, M.D., Young, S. (2002). Non-pegmatitic Deposits of Beryllium: Mineralogy, Geology, Phase Equilibria and Origin. In *Beryllium: Mineralogy, Petrology, and Geochemistry*. Ed. by E.S. Grew, de Gruyter. University of Maine. <http://doi.org/10.2138/rmg.2202.50.01>

Burt, D.M. (1988). Stability of genthelvite, $Zn_4(BeSiO_4)_3S$: an exercise in chalcophilicity using exchange operators. *American Mineralogist*, 73, 1384-1394.

Dunn, P.J. (1976). Genthelvite and the helvine group. *Mineralogical Magazine*, 40, 627-636.

Hsu, L.C. (1983). Some phase relationships in the system $BeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ with comments on effects of HF. *Memoir of the Geological Society of China*, 5, 33-46.

Miller, R.R. (1996) Structural and textural evolution of the Strange Lake peralkaline rare-element (NYF) granitic pegmatite, Quebec-Labrador. *Canadian Mineralogist*, 34, 349-371.

Whalen, J.B., Currie, K.L., and Chappell, B.W., 1987, A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95, 407-419.

Wood, S.A. (1992). Theoretical prediction of speciation and solubility of beryllium in hydrothermal solution to 300°C at saturated vapor pressure: application to bertrandite/phenakite deposits. *Ore Geology Reviews*, 7, 249-278. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(92\)90012-A](https://doi.org/10.1016/0169-1368(92)90012-A)

Salvi, S., Williams-Jones, A.E. (1996). The role of hydrothermal processes in concentrating high-field strength elements in the Strange Lake peralkaline complex, northeastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1917-1932. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00071-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00071-3)

Надійшла до редколегії 15.12.19

О. Дубина^{1,2}, д-р геол. наук, старш. наук. співроб.,
E-mail: dubyna_a@ukr.net;

С. Кривдик², д-р геол.-мінералог. наук, проф.,
E-mail: kryvdik@ukr.net;

В. Бельський², канд. геол. наук,
E-mail: belskyi_vm@ukr.net;

О. Вишневський², канд. геол.-мінералог. наук, старш. наук. співроб.,
E-mail: vyshnevskyy@i.ua;

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

²Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України,
пр. Акад. Палладіна, 34, м. Київ, 03680, Україна

ОСОБЛИВОСТІ БЕРИЛІЄВОЇ ТА РІДКІСНОМЕТАЛЕВОЇ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ В СІЄНІТІ ПЕРЖАНСЬКОГО РОДОВИЩА (УКРАЇНСЬКИЙ ЩИТ)

Наведено результати дослідження рудних та акцесорних мінералів із сієніту Пержанського родовища берилію. Серед Be-вмісних мінералів діагностовано фенакіт і гентгельвін. Останній вирізняється максимальним, порівняно з опублікованими в літературі аналізами гентгельвіну Пержанського родовища, і близьким до максимального теоретичного вмістом ZnO, що зумовлено лужним характером досліджуваної породи ((Na+K)/Al=1,09). Гентгельвін є більш пізнім мінералом відносно фенакіту або утворюється за рахунок його заміщення в результаті підвищення лужності розплаву в процесі диференціації. З інших мінералів рідкісних металів виявлено колумбіт з підвищеним вмістом Mn, Y-силікат (кейвіїт-(Y)?), рідкісноземельний фторкарбонат (бастнезит). Наявність флюориту та рідкісноземельних карбонатів, агрегати яких часто приурочені до гентгельвіну або фенакіту, може свідчити, що в рудоносних флюїдах Be і REE переносилися у вигляді комплексних фтор-карбонатних сполук. Ураховуючи геохімічні характеристики порід (метаглиноземисті, сублужного і лужного ряду, глибокі негативні Eu-аномалії, низький вміст Sr, Ba, підвищений – HFS елементів) Суцано-Пержанського району, причини збагачення на рідкісні метали і Be пов'язані з інтенсивним польовошпатовим фракціонуванням вихідних розплавів, що зумовлювало пересичення лугами, збагачення леткими компонентами і рідкісними металами (Be, Li, REE, Y, Nb, Ta) залишкових порцій магматичних розплавів гранітоїдного або сієнітового складу. Постмагматичні лужні розчини, збагачені F і CO₃²⁻, сприяли концентруванню Be у флюїдній фазі з подальшою його міграцією і кристалізацією гентгельвіну.

Ключові слова: гентгельвін, фенакіт, сублужні граніти, лужні сієніти, колумбіт, Пержанське родовище, Український щит.

А.Дубина^{1,2}, д-р геол. наук, ст. науч. сотр.,

E-mail: dubyna_a@ukr.net;

С. Кривдик², д-р геол.-мінералог. наук, проф.,

E-mail: kryvdik@ukr.net;

В. Бельський², канд. геол. наук,

E-mail: belskyi_vm@ukr.net;

А. Вишневський², канд. геол.-мінералог. наук, ст. науч. сотр.,

E-mail: vyshnevskyy@i.ua;

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

УНІ "Інститут геології", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;

²Інститут геохімії, мінералогії і рудоутворення ім. Н.П. Семененко НАН України,

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

ОСОБЕННОСТИ БЕРИЛЛИЕВОЙ И РЕДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В СИЕНИТЕ ПЕРЖАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (УКРАИНСКИЙ ЩИТ)

Приведены результаты исследования рудных и акцессорных минералов из сиенита Пержанской месторождения бериллия. Среди Be-содержащих минералов диагностирован фенакит и гентгельвин. Последний отличается максимальным, по сравнению с опубликованным в литературе, анализами гентгельвина Пержанского месторождения, и близким к максимальному теоретическому содержанию ZnO, что обусловлено щелочным характером исследуемой породы ((Na+K)/Al=1,09). Гентгельвин более поздний минерал относительно фенакита или образуется за счет его замещения в результате повышения щелочности расплава в процессе его дифференциации. Из других минералов редких металлов обнаружен колумбит с повышенным содержанием Mn, Y-силікат (кейвиит-(Y)?), редкоземельный фторкарбонат (бастнезит). Наличие флюорита и редкоземельных карбонатов, агрегаты которых часто приурочены к гентгельвину или фенакиту, может свидетельствовать о том, что в рудоносных флюидах Be и REE переносились в виде комплексных фтор-карбонатных соединений. Учитывая геохимические характеристики гранитов и сиенитов (метаглиноземистые, субщелочного и щелочного ряда, глубокие негативные Eu-аномалии, низкое содержание Sr, Ba, повышенное – HFS элементов) Суцано-Пержанского района, причины обогащения этих пород на редкие металлы (REE, Y, Nb, Ta) и Be связаны с интенсивным полевошпатовым фракционированием исходных расплавов, что вызывало пресыщение щелочами, обогащение летучими компонентами и редкими металлами остаточных порций магматических расплавов гранитоидного или сиенитового состава. Постмагматические щелочные растворы, обогащенные F и CO₃²⁻, способствовали концентрированию Be во флюидной фазе с последующей его миграцией и кристаллизацией гентгельвина.

Ключевые слова: гентгельвин, фенакит, субщелочные граниты, щелочные сиениты, колумбит, Пержанское месторождение, Украинский щит.

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 681.518:338.24

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.14>

В. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: vitalii.zatsekovnyi@gmail.com;
Л. Плічко, асп., E-mail: plichkoL@ukr.net;
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
О. Приліпко, канд. психол. наук,
E-mail: prylypko1964@bigmir.net;
Військовий інститут Київського національного університету
імені Тараса Шевченка, вул. Ломоносова, 81, м. Київ, 8103189, Україна;
О. Ніколаєнко, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
E-mail: n-a-@ukr.net;
Національний авіаційний університет,
пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03058, Україна;
Т. Мужанова, канд. наук з держ. управління, доц.,
E-mail: muzanovat@gmail.com;
Державний університет телекомунікацій,
вул. Солом'янська, 7, м. Київ, 03110, Україна

**ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
У ЛАНДШАФТНО-ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ**

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, старш. наук. співроб. О.Л. Шевченком)

Для сучасних міст характерні такі негативні наслідки цивілізації, як ущільнення міської забудови, забруднення повітря, води, ґрунту, зростаючий рівень шуму і вібрацій, "теплові острови", вплив магнітних, електричних, іонізаційних полів тощо. Небувалими темпами зростає використання різноманітних природних ресурсів і масштаби забруднення зовнішнього середовища відходами виробництва та споживання.

Одним із дієвих механізмів зняття цих негативних наслідків є ландшафтно-екологічний моніторинг (ЛЕМ) стану існуючої екологічної інфраструктури міст (споруд і об'єктів, призначених для охорони, відтворення і поліпшення навколишнього природного середовища), яка покликана забезпечити декомпенсуючу протидію наслідкам антропогенного навантаження.

ЛЕМ необхідний для розробки науково-обґрунтованої міської екологічної політики та оптимізації системи природоохоронного управління. Для прийняття ефективних кваліфікованих управлінських рішень щодо поліпшення екологічної ситуації міст потрібна повна і достовірна інформація про основні природні умови. Такі дослідження, спрямовані на системний збір інформації про територію, найчастіше належать до сфери ландшафтно-екологічного картографування.

Обґрунтовано необхідність застосування в ЛЕМ геоінформаційних систем (ГІС) і представлено модель оцінки природстатусу інформації, яку можна отримати в процесі впровадження ГІС в ЛЕМ. Запропонована модель, за розрахунками авторів, дозволить зменшити ентропію (невизначеність) системи майже вдвічі, що свідчить про необхідність використання ГІС при ландшафтно-екологічному моніторингу.

Ключові слова: геоінформаційна система, ландшафтно-екологічний моніторинг, інформативність, геоінформаційне моделювання.

Вступ. Постійне зростання екологічного навантаження в Україні викликає велику стурбованість не тільки фахівців і науковців, але й звичайного населення. Особливо це стосується великих міст, передусім індустріальних, де людина деформує біосферу загалом і, будучи її частиною, гостро відчуває наслідки цієї деформації на собі.

Міста характеризуються високою концентрацією населення, що мешкає на обмеженій території. Подібне зосередження людей зумовлює й концентрацію всієї сукупності господарських і соціальних відношень, яке спричиняє виникнення складної, найчастіше суперечливої системи.

Характерними негативними наслідками урбанізації стали: ущільнення міської забудови, зростання забруднення повітря, ґрунту, руйнування природних екосистем, підвищення рівня шуму і вібрацій, виникнення "островів тепла" і парникового ефекту, шкідливий вплив магнітних, електричних, іонізаційних полів, виснаження озонового шару, зникнення низки біологічних видів тощо. Водні об'єкти, які розташовані на території міст, усе більше потерпають від надмірного антропогенного впливу. Поверхнево-схиловий стік з території міської забудови, автошляхів і залізниць, різноманітні смітники, а також рекреаційні зони з пересиченням відпочивальників сприяють потраплянню в озеро значної кількості хімічних сполук (Білявський, 2005). Небувалими темпами зростає використання різноманітних природних ресурсів і масштабів забруднення зовнішнього середовища відходами виробництва і споживання.

На жаль, населення та уряд України, якщо й розуміють увесь спектр своїх пагубних дій на природне середовище, усе ж таки продовжують його безжалісно руйнувати та всіляко забруднювати. Фрагментарні природні екосистеми, що залишились в урбанізованих системах уже неспроможні компенсувати негативний вплив антропогенних чинників, а заходи, що приймаються місцевою владою та урядом країни лише частково стримують збільшення агресивного впливу побутових, транспортних та індустріальних відходів на середовище мешкання міського жителя.

Перед суспільством стоїть надзвичайно актуальне завдання організації використання природних ресурсів таким чином, щоб припинити їхню подальшу деградацію і здійснити реальні кроки до суттєвого поліпшення екологічного стану довкілля. Це можливе лише за рахунок організації ефективного моніторингу існуючого екологічного стану територій, рекреаційних зон і розширенням природно-заповідного фонду.

Постановка проблеми. Дієвими механізмами зняття негативних наслідків урбанізації є: локальне чищення навколишнього середовища; збереження непорушених господарською діяльністю територій з природною біотою; розбудова регіональної екологічної інфраструктури міст (споруд і об'єктів, призначених для охорони, відтворення і поліпшення навколишнього природного середовища); раціональне використання природних ресурсів, особливо відновлюваних на основі інтенсивних і ефективних технологій; своєчасне виявлення і прогнозування

глобальних (зовнішніх) і регіональних (внутрішніх) екологічних загроз на базі наукових досліджень в екологічній сфері; міжнародне співробітництво та кооперація для запобігання глобальним і транскордонним екологічним загрозам на основі захисту законних прав громадян; розробка ефективних методів зберігання та утилізації озброєння виведеного з бойового складу; рекультивації територій, пов'язаних з військовою діяльністю, а також радіоактивним забрудненням; запобігання завезенню на територію держави для переробки та захоронення матеріалів небезпечних для населення і навколишнього середовища тощо. Усі ці механізми покликані забезпечити декомпенсуючу протидію наслідкам екологічних загроз.

Екологічна значимість зелених насаджень, дерев і рослин у містах є надзвичайно високою. Їхні легкі виділення – аеростимулятори і фітонциди – сприятливо впливають на організм, іонізують і озонують повітря. Парки, сквери, бульвари збагачують повітря киснем, регулюють вологість, знижують міський шум. Крім того, рослини очищають повітря від пилу, поглинають токсичні речовини – компоненти відпрацьованих газів автомобілів і промислових викидів. Не тільки збереження, але й подальший розвиток зелених насаджень міст є надзвичайно важливим екологічним завданням. Однак і тут у країні є невирішені питання. Так, з урахуванням комплексної гігієнічної оцінки не виявлено види дерев, чагарників і трав'янистих рослин, найбільш оптимальних для умов міста. Озеленення міст здебільшого не відповідає сучасним вимогам. У старій частині міста нерідко відбувається сильне затінення житлових будинків деревами, що несприятливо впливає на якість внутрішнього житлового середовища і здоров'я населення. Новобудови ж, навпаки, як правило, взагалі не мають озеленення, а якщо і мають, то недостатнє. Отже, в умовах інтенсивного зростання і розвитку міських агломерацій особливо гостро стоїть питання ефективного використання обмежених ресурсів міської рекреаційної території, до яких відносять різноманітні системи ресурсо- та енергозбереження, ґрунтово-рослинний шар міської та прилеглої території, природно-заповідний фонд, паркові мережі міської інфраструктури, екологічні каркаси та ніші міст, екологічно реставровані ландшафти, усі наявні природні ресурси та сприятливі умови життя тощо.

Актуальність теми і ступінь розробленості теми дослідження. Ущільнення міського простору спричинює зменшення рекреаційних зон або взагалі їхнє знищення з наступною деградацією зелених каркасів міст. Сьогодні необхідні такі форми і способи взаємодії природної й техногенної підсистем міста, за яких інтенсивність використання, відновлення і збагачення природних ресурсів буде зростати, а природні умови – поліпшуватися. Ідеться про усвідомлене управління природними процесами і явищами в бажаному напрямку при інтенсифікації містобудівної діяльності.

Тому сьогодні актуальною проблемою є застосування ландшафтно-екологічного підходу до вивчення міської території, моніторинг (оцінка) екологічного стану рекреаційних ресурсів міста, під яким розуміють складну систему збору, обробки, збереження і передачі інформації про стан суб'єктів і об'єктів рекреаційного природокористування та їхню взаємодію з метою наступної оцінки (контролю), прогнозу і керування. У ході моніторингових досліджень відстежується протікання рекреаційних процесів, зміни у використанні й стані природно-рекреаційних ресурсів, якості рекреаційного середовища, виявляється вплив різних факторів на психофізіологічний стан рекреантів. Ландшафтно-екологічний аналіз необхідний для розробки науково-обґрунтованої міської екологічної політики та оптимізації системи природокористування.

Аналіз попередніх досліджень. Еколого-географічні (геоекологічні) дослідження в Україні успішно розвиваються в Інституті географії НАНУ (О. І. Маринич, Л. Г. Руденко, Л. М. Шевченко, В. П. Гриневецький, В. М. Пащенко, В. С. Давидчук, Г. О. Пархоменко, В. О. Шевченко, В. А. Барановський), Київському університеті імені Тараса Шевченка (П. Г. Шищенко, М. Д. Гродзинський, Л. Л. Малишева, Л. М. Шевченко), Львівському (Г. П. Міллер, І. М. Волошин, А. В. Мельник, В. М. Петлин), Одеському (Г. І. Швєбс, О. Г. Топчієв), Чернівецькому (В. М. Гуцуляк, Л. І. Воропай, М. І. Жупанський, М. О. Кирилюк, В. П. Куниця), Харківському (І. Г. Черваньов, В. Ю. Некос, Н. В. Максименко) університетах, Івано-Франківському ТУНГ (О. А. Адаменко). Вивченню і оптимізації біотичних компонентів міських ландшафтів присвячено численні праці як східноєвропейських (Ю. Б. Хромов, В. П. Кучерявий, А. П. Вергунов, А. Н. Белкін, С. А. Яблоков, О. О. Лаптев), так і західноєвропейських науковців, передусім німецьких (G. Richter, E.-M. Albertshauser, M. Leesch, U. Wilke, K. Ermer, A. Paul). Проте, як свідчить зростання екологічної напруги у країні, дослідження у цій сфері ще далекі від завершення.

Об'єкт дослідження – ландшафтно-екологічний моніторинг (ЛЕМ).

Метою роботи є оцінка доцільності використання геоінформаційних систем в ЛЕМ.

Виклад основного матеріалу. Для прийняття ефективних кваліфікованих управлінських рішень щодо поліпшення екологічної ситуації міст потрібна повна і достовірна інформація про основні природні умови. Дослідження, спрямовані на системний збір інформації про територію, найчастіше належать до сфери ландшафтно-екологічного картографування.

Сучасний ландшафт являє собою природно-антропогенний комплекс, у межах якого природні, антропогенні, демографічні, етнічні й соціокультурні фактори перебувають у тісній взаємодії, утворюючи однорідну за умовами розвитку, єдину, нерозривну, притаманну даному регіону або місцевості систему – геоекосистему (Макаров та ін., 2002).

Ландшафтно-екологічний підхід до вивчення міської території активно використовує методологію системного аналізу, за якою місто розглядається як складна, поліструктурна, територіальна, відкрита, енергетично субсидована (Одумом, 1986), геохімічно акумулятивна управлінська система – урбогеосистема (Макаров та ін., 2002).

Ландшафтно-екологічний підхід (геоекологічний) є симбіозом ландшафтного та екологічного підходів. Основи геоекологічного підходу були закладені німецьким біогеографом Карлом Троллем у статті "*Luftbildplan und ökologische Bodenforschung*" ("План аерофотокартування та екологічне дослідження ґрунтів"). Він дав таке визначення ландшафтній екології – це "дослідження цілісного комплексу взаємозв'язків між угрупованнями живих організмів (біоценозів) та їхніми екологічними умовами, наявних у певних одинцях ландшафту. У просторі цей взаємозв'язок відображається в певних просторових структурах чи природних територіальних одиницях різних масштабів" (Troll, 1939).

Ландшафтно-екологічний підхід поряд із сильними в евристичному відношенні особливостями, успадкованими від ландшафтознавства (територіальність, поліцентризм моделі геосистеми) та екології (концепції сукцесії, методи ординації, моноцентризм моделі екосистеми), має і власні риси. Як і у науках, згаданих вище, об'єктом екології ландшафтів виступають полікомпонентні природно-антропогенні системи. Однак при їхньому

дослідженні ландшафтно-екологічний підхід значно ширше користується наслідками, що випливають із загальнонаукового принципу додатковості. Відповідно до цього принципу повноцінне пізнання складного об'єкта або явища можна досягти за умови дослідження його в різних "проекціях" (тобто за допомогою різних моделей), звести які до однієї принципово неможливо.

Виходячи із цього, у сучасній екології ландшафтів сформувалось кілька постулатів і обмежень у використанні ландшафтно-екологічного підходу. Серед них найбільш істотними є такі:

- розуміння того, що реальність неможливо звести до однієї моделі (екосистеми або геоекосистеми). Практична мета визначає оптимальний спосіб декомпозиції природних систем (їхній поділ на елементи або структурні частини), що призводить до безлічі типів їхніх структур;
- розуміння поліцентричності геосистеми – центральна методологічна установка геоекологічного підходу (у центр можна поставити не тільки біологічні, але й інші компоненти, навіть цілі ландшафти). Концепції гео- та екосистеми мають свої переваги. Уявлення про геосистеми більш наближені до природної реальності. Концепція екосистеми доволі корисна при розв'язанні низки конкретних завдань. Тому екологія ландшафтів у своїх дослідженнях використовує як полі- (геосистемний), так і моно- (екосистемний) підходи. Причому на відміну від екології у центр екосистемної моделі ставляться (поміщуються) не тільки біотичні, а й інші компоненти;

- акцент на функціональному аналізі геосистем, на просторовість і генезис геосистем. У ландшафтній екології основна увага приділяється процесному і функціональному аналізу геосистем. Причому геосистеми сприймаються не як територія або об'єми зі специфічним складом елементів і своєю будовою, а як арили та об'єми, насичені різними динамічними процесами, які взаємодіють між собою і навколишнім середовищем. Виходячи із специфіки цих процесів і виділяються геосистеми;

- вивчення параметрів функціонування різних типів ландшафтів (урахування впливів середовища). Для екології ландшафтів характерною є значна увага до впливу на геосистеми зовнішніх факторів, зокрема антропогенних. Порівняно з ландшафтознавством ця наука розглядає геосистеми як значно більш пов'язані із зовнішнім середовищем, тобто вони є більш "відкритими";

- адаптивність компонентів ландшафту;

- акцент на центрованість проблеми взаємодії людини з природними системами. При цьому її теоретична база розробляється як наукова основа регламентації раціональної з екологічної позиції поведінки людини в ландшафті;

- прикладні аспекти геоекологічного підходу полягають у вивченні стійкості ландшафту, нормування антропогенних навантажень на ландшафти тощо.

Вплив природних та антропогенних факторів на навколишнє середовище представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Вплив природних та антропогенних факторів на навколишнє середовище

Фактор	Значення та вплив на навколишнє середовище
Природні фактори	
Клімат	Визначає ступінь комфортності погодних умов і окремих основних факторів клімату (тепловий комфорт, вітровий режим, опади та ін.). Мікроклімат зумовлює ступінь мікрокліматичних умов (норми інсоляції, вологості, допустима швидкість вітру та ін.)
Рельєф	Ухили забезпечують різний рівень інсоляції, стоку поверхневих вод, накопичення вологості, масштаб ґрунтової ерозії
Водойми	Накопичення та випаровування вологи сприяє утворенню теплової енергії, впливає на температурний режим, регулює вологість повітря та інтенсивність радіації
Заболоченість і затоплення	Забезпечують життєдіяльність окремих екосистем, сприяють накопиченню вологи та живлення річок у міжсезонний період
Рослинність	Накопичення необхідної для життєдіяльності біомаси, вплив на ступінь забруднення атмосфери, радіаційний, температурний режими, вологість повітря, швидкість вітру
Антропогенні фактори	
Щільність забудови	Визначає раціональність використання міської території, впливає на мікрокліматичні показники, наявність рослинного покриву, вітровий режим території
Система транспорту	Визначає шумовий режим у місті, його спектральний склад, ступінь забруднення атмосфери й забруднення ґрунту та рослин токсичними отруйними речовинами
Характер промисловості	Залежно від класу шкідливості промисловість впливає на забруднення атмосфери отруйними газами, визначає кількість пилу в повітрі й на поверхні ґрунту
Рівень благоустрою території	Впливає на мікроклімат міської території, ступінь її озеленення, комфортні умови життєдіяльності населення

Усебічна оцінка екологічного стану природних ресурсів і прогнозування їхніх змін під впливом антропогенних факторів являє собою надзвичайно складне завдання. Це обумовлено передусім необхідністю урахування всіх процесів, що відбуваються в природних екосистемах, і різною стійкістю екосистем до тих або інших техногенних впливів. Аналіз ускладнюється тим, що деякі фактори, які впливають на функціонування екосистем, можуть частково компенсувати один одного. Додаткову складність створює нестійкий характер просторової локалізації техногенних забруднень, обумовлений перенесенням забруднювальних речовин через атмосферу, поверхневі та ґрунтові води.

Земна поверхня (включаючи верхні горизонти літосфери), а разом з нею і речовино-енергетичні потоки змінюються в результаті таких загальних на всій планеті процесів, спрямованих на задоволення потреб людини, як: знищення природного рослинного та ґрунтового покриву

для розробки запасів мінеральної сировини; регулювання стоку рік та інших водотоків шляхом створення водосховищ; використання землі під будівництво шляхів сполучення та інженерної інфраструктури; відчуження земель під очисні споруди і місця збереження, утилізації й захоронення відходів; створення штучного рослинного покриву в садах, парках, спортивних спорудах та інших місцях відпочинку.

Ландшафтно-екологічний моніторинг здійснюється на основі різних методів. Крім традиційних методів геохімії, які використовуються при вивченні техногенних систем, впроваджуються такі специфічні засоби, як аналізи снігу, верхнього торфу, волосся людини, використання штучних сорбентів для визначення в ґрунтах і водах важких металів, аерокосмічна зйомка (за її допомогою, наприклад, у гірничо-заводських районах установлюються техногенні ореоли розсіювання), ландшафтно-геохімічне картографування (Франчук, Кравець, 2013).

Оскільки практично вся інформація (80–90 %) про стан певної території дослідження в процесі ландшафтно-екологічного моніторингу регіону має просторову прив'язку, то цілком очевидно, що базовою інформаційною технологією ефективного ЛЕМ мають виступити геоінформаційні технології (ГІТ).

Упровадження ГІТ, а саме геоінформаційних систем (ГІС), дозволить суттєво поліпшити ЛЕМ за рахунок розробки моделей міграції забруднювачів у геологічному середовищі, атмосфері й гідросфері; при дослідженні ерозії і деградації ґрунтів; моделюванні паводкових ситуацій та розвитку екзогенних процесів; прогнозуванні і оцінці викидів в атмосферу небезпечних хімічних речовин і при вирішенні багатьох інших завдань.

Крім того, ГІС може стати в пригоді для створення більш складних систем управління територіями. Наприклад, для інтеграції накопиченої інформації в текстовому і табличному поданні в єдину просторово-орієнтовану базу даних, яка дозволить автоматично виявляти закономірності між природними компонентами і навіть окремими елементами цих компонентів, подавати результати в наочному графічному вигляді (Зацерковний та ін., 2016; Бурачек та ін., 2011; Красовский та Поспелов, 1962).

Застосування методів геоінформаційного моделювання дозволяє автоматизувати розв'язок безлічі задач, починаючи від обчислень відстаней і площ, і закінчуючи побудовою моделей складних геосистем і процесів з метою управління та прогнозування майбутніх станів.

Використання геоінформаційних систем дозволяє оперативно отримувати інформацію за запитом і відображати її на карті, оцінювати стан екосистеми та прогнозувати її розвиток.

Основними аналітичними можливостями ГІС при такому моделюванні можна вважати: аналітичні функції роботи з базами даних (БД); картометричні функції; моделювання поверхонь та аналіз растрових зображень; побудова буферних зон; оверлейні операції; районування (зонування) (Зацерковний та ін., 2016; Шипулін, 2012).

Геомодельовання може бути представлено у вигляді кортежу:

$\langle F, f_i, R_r, Sh_i, A_{ik}, S_{ik}, P_m, C_i, W_i, [\text{допоміжні_дані}] \rangle$,

де F – мета (або постановка задачі) геомодельовання; f_i – локальні задачі – складові загальної задачі моделювання; R_r – відношення між об'єктами на карті; Sh_i – шейп з об'єктами ландшафту (відповідає локальній задачі f_i); A_{ik} – атрибутивна таблиця k -го об'єкта i -го шейпу; S_{ik} – шкала вимірів для атрибутів відповідних наборів даних; P_m – процеси, які потребують моделювання; C_i – критерії прийняття оптимального рішення; W_i – вага набору даних i .

Предметна область геоінформаційного моделювання в ЛЕМ представлена на рис. 1.

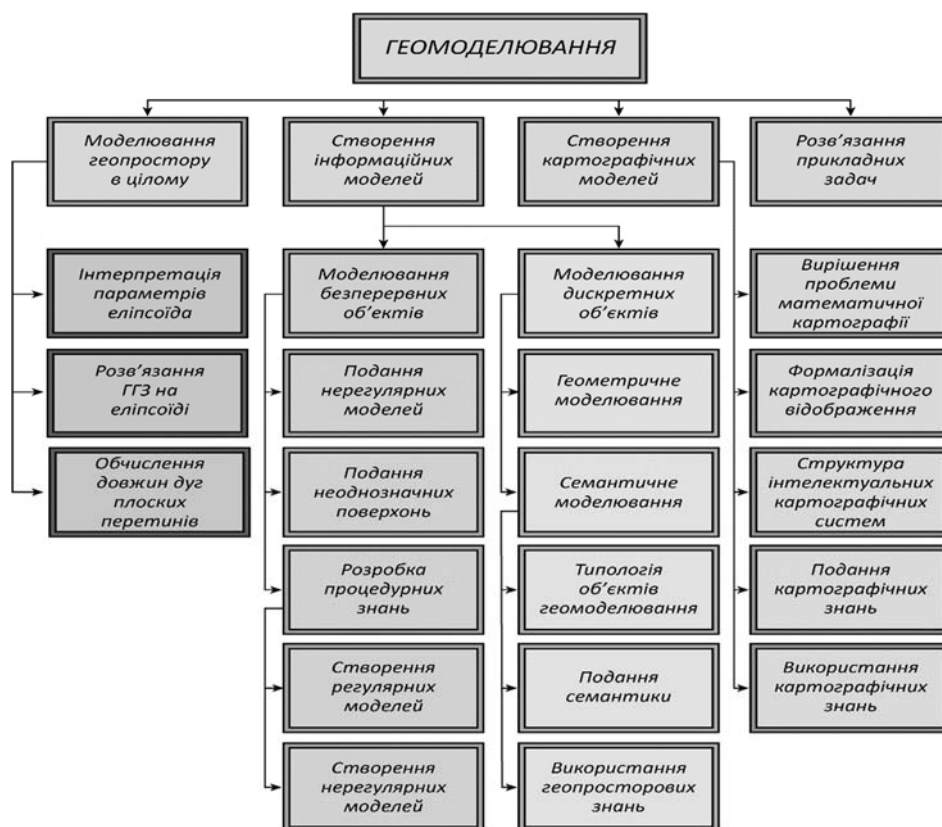


Рис. 1. Предметна область геоінформаційного моделювання

Компоненти і функції такої ГІС подано в табл. 2. Геоінформаційні моделі компонентів ландшафту включають цифрові моделі рельєфу, клімату, флори, фауни, які водночас несуть інформацію для моделювання ландшафтного комплексу загалом та його еволюції.

Об'єктами дослідження ГІС у процесі ЛЕМ виступають реально існуючі об'єкти (процеси, явища, системи, поля) певної території, зв'язки між ними, а також закономірності, притаманні певній множині (класу) досліджуваних об'єктів.

Таблиця 2

Геоінформаційна система ландшафтно-екологічного моніторингу (ЛЕМ)							
Види моніторингу (за компонентами ландшафту)	Система збору і зберігання інформації (СЗІІ)			Система обробки Інформації (СОІ)			Підсистема ландшафту
	Система збору і підготовки наявної інформації СЗІ	Система проб і хімічного аналізу СПХА	Система зберігання інформації (банк даних) БД	Система розрахунку поточної інформації СРІ	Система картографування екологічної обстановки СКЕО	Система прогнозування екологічної обстановки СПЕО	
Субстанційно-геокомпонентний блок (І)							
аеро-	+	+	+	+	+	+	ПК
гідро-	+	+	+	+	+	+	
педо-	+	+	+	+	+	+	
біо-	+	+	+	+	+	+	
Факторно-геокомпонентний блок (ІІ)							
метео-	+		+	+	+	+	ПК
геоматичний	+		+	+	+	+	
техногенний (джерела забруднення)	+	+	+	+	+	+	ТГ
соціально-економічний	+		+	+	+	+	СЕ
Комплексний (ландшафтний) блок (ІІІ)							
ландшафтно-геохімічний	+	+	+	+	+	+	ЛГХ
ландшафтно-геофізичний	+	+	+	+	+	+	ЛГФ
Прикладний (демографічно-екологічний) блок (ІV)							
медико-екологічний	+	+	+	+	+	+	Д

Підсистеми: ПК – природних компонентів; ТГ – техногенна; СЕ – соціально-економічна; ЛГХ – ландшафтно-геохімічна; ЛГФ – ландшафтно-геофізична; Д – демографічна.

Метою дослідження є одержання додаткової інформації про об'єкти (Кочуров, 2003).

Математичні моделі об'єктів моніторингу і відношення між ними (що використовуються в ГІС), які приведені в систему, утворюють тезаурус цієї системи, який являє собою множину математичних моделей, упорядкованих і класифікованих за певною системою ознак (Зацерковний та ін., 2016).

Тезаурус – це "запас" моделей, які є в розпорядженні дослідника за даного стану теоретичного обґрунтування ГІС, або обрані чи створені ним, виходячи із практичних міркувань, з урахуванням наявних обмежень процесу управління (Зацерковний, 2012).

Отже, для підвищення ефективності ЛЕМ за допомогою ГІС необхідно розширити тезаурус цієї системи, що включає в себе моделі досліджуваних об'єктів, результатів вимірів, зовнішніх факторів впливу, вимірювальної системи та її підсистем, головними з яких є розроблення моделі оцінки приросту інформації у процесі впровадження ГІС в ЛЕМ, розроблення моделі оцінки приросту інформації при впровадженні ГІС у канал зворотного зв'язку, розроблення моделі інтеграції баз даних, існуючих ІС у ГІС, розроблення моделі прийняття рішень за допомогою ГІС, розроблення моделі управління процесом ЛЕМ за допомогою ГІС.

Аналізуючи практику розв'язання задач ЛЕМ за допомогою ГІС, не можна не звернути уваги на неформальність постановки більшості задач (Кочуров, 2003). Експерт-аналітик, що працює з даними інформаційного середовища певної території або об'єкта моніторингу, маючи просторові й атрибутивні дані, звертається до карт і схем певної території дослідження, маючи найчастіше лише інтуїтивне уявлення про план наступних дій. Це зумовлюється як нестачею вихідних даних, так і розмаїттям реальних ситуацій, що складаються. Тому в умовах складної формалізації задач ЛЕМ завданнями ГІС є не видача готових рішень, а надання програмного інструментарію для формування рішень.

Процес ЛЕМ зазвичай розтягнутий у часі та може вестися або безперервно, або дискретно з певною частотою $1/T_n$, яка обирається з умови достатності часу для

зменшення невизначеності до заданого рівня за певної інтенсивності моніторингу й управління. Його можна розглядати як процес виконання ГІС за певним алгоритмом деяких складних k іспитів (випробувань, досліджень) G_{ij} ($i=1, 2, \dots, k$) ($j=1, 2, \dots, l$), що не перевершують l іспитів. У процесі здійснення цих іспитів частина невизначеності (ентропія) замінюється інформацією, тобто процес ЛЕМ зводиться до одночасного паралельного, або зсуного в часі, переведення багатомірного вектора $X(x_i, t, \tau)$ в багатомірний вектор $Y(y_i, t, \tau)$ $X \rightarrow Y$ (рис. 2).

Незважаючи на наявність у такій системі не тільки фізичних, але й інформаційних, екологічних та інших процесів, обмежимося розглядом тільки інформаційних взаємодій. Властивості такої системи передбачають наявність у ній елементів і зв'язків різної природи. Відстежуючи ці зв'язки, можна побачити результат взаємодії не тільки елементів, але й усієї системи загалом.

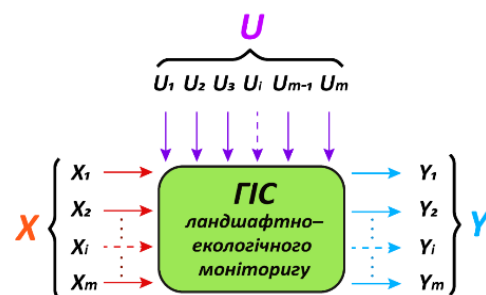


Рис. 2. Вхідні й вихідні сигнали ГІС у ЛЕМ

У процесі функціонування ГІС до неї надходить інформація про стан об'єктів моніторингу, фіксуючи тим самим певні властивості зовнішніх і внутрішніх процесів та явищ, що відбуваються на території або об'єкті дослідження і впливають на них. У зв'язку з цим необхідно створити модель оцінки приросту інформації, яку можна очікувати від впровадження ГІС у процес ЛЕМ. Володіючи можливістю фіксації зміни станів об'єктів моніторингу, вплив на них інших систем і природних чинників, ГІС аналізує ці зміни і інтерпретує їх, надаючи тим самим

додаткову інформацію до каналу управління, тобто переводить об'єкт моніторингу в новий апостеріорний стан, який визначається вектором $Y(t, \tau)$.

Доцільно розглянути підходи, щодо оцінки приросту інформації. Відомо декілька способів у визначенні кількості інформації: ентропійний; алгоритмічний; комбінаторний; семантичний і прагматичний (Понтрягин та ін., 1983). Перший підхід одержав застосування в задачах кількісного визначення складності системи і рівня зовнішніх впливів, другий і третій – для опису (відтворення) об'єкта, четвертий – для опису змістовної частки повідомлення, що передається її отримувачу, п'ятий – акцентує увагу на корисності інформації, яка передається.

Найбільш доцільним для оцінки приросту інформації, що можна отримати за допомогою впровадження ГІС у ЛЕМ, є ентропійний підхід (Зацерковний, 2012). Ентропія має переваги перед імовірнісною оцінкою приросту кількості інформації, оскільки не пов'язана із статистичними законами розподілу випадкових величин (Грангшвили, 2003). За величиною ентропії можна судити про рівні надійності каналів ГІС при виборі оптимального. Кількість інформації, що отримується в процесі управління територіями, дорівнює зміні ентропії

$$I_{G_{ij}}(X, t, \tau) = H_0(X, t, \tau) - H_{G_{ij}}(X, t, \tau),$$

де $H_{G_{ij}}(X, t, \tau) = p_{G_{ij}} H_{G_{ij}}(X, t, \tau) + \dots + p_{G_{il}} H_{G_{il}}(X, t, \tau)$ – умовна ентропія стану об'єкта управління при здійсненні складного іспиту (дослідження) G_{ij} , що складається з l підспитів; $p_{G_{ij}}$ – імовірність результату іспиту G_{ij} .

Найбільш цікавими для практики є випадки, коли має місце точне, але із запізнюванням на τ_3 , відтворення стаціонарного випадкового процесу (Понтрягин та ін., 1983): $Y(y_i, t, \tau) = X(x_i, t - \tau_3, \tau)$ або коли вихідний процес відтворюється без запізнювання, але діє вектор збурень U (рис. 2), який не залежить від вхідного процесу

$$Y(y_i, t, \tau) = X(x_i, t - \tau_3, \tau) + U(u_j, t, \tau),$$

де $j = 1, 2, \dots, m$.

При цьому передбачається, що вектор $X(t, \tau)$ характеризує апіорний стан об'єкта без урахування раптових відмов (надзвичайних або аварійних) ситуацій.

Середню кількість інформації, отримувану при переведенні вектора $X(t, \tau)$, можна визначити за формулою (Кочуров, 2003)

$$\log_2 \frac{f(X, Y, t, \tau)}{f(X, t, \tau) f(Y, t, \tau)} = \log_2 \frac{1}{\sqrt{1-r^2}} - \frac{r^2 \log_2 e}{2(1-r^2)} \left[\frac{(X-m_X)^2}{\sigma_X^2} - \frac{2(X-m_X)(Y-m_Y)}{r\sigma_X\sigma_Y} + \frac{(Y-m_Y)^2}{\sigma_Y^2} \right] \quad (4)$$

Підставивши вирази (2), (3) і (4) у формулу (1), після певних перетворень можна отримати

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = \log_2 \frac{1}{\sqrt{1-r_{XY}^2(t, \tau)}} = -\frac{1}{2} \log_2 [1 - r_{XY}^2(t, \tau)],$$

$$r_{XY}(t, \tau) = \frac{1}{\sigma_X \sigma_Y} \int_{-\infty}^{\infty} (X - m_X)(Y - m_Y) f(X, Y, t, \tau) dX dY,$$

де r_{XY} – коефіцієнт кореляції векторів X , Y ; $\sigma_X^2(t, \tau)$ – дисперсії векторів X , Y .

Ентропія випадкового m -мірного вектора $X(t, \tau)$, що підпорядковується нормальному закону розподілу, дорівнює: $H(X, t, \tau) = \log_2 \sqrt{(2\pi e)^m |R^{XX}|}$.

Середня кількість інформації при передачі $X \rightarrow Y$ можна виразити через кореляційні матриці

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 \frac{|R|}{|R^{XX}| + |R^{YY}|}, \quad (5)$$

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(X, Y, t, \tau) \log_2 \frac{f(X, Y, t, \tau)}{f(X, t, \tau) f(Y, t, \tau)} dX dY \quad (1)$$

де $f(X, Y, t, \tau)$ – загальний диференціальний закон розподілу векторів X і Y ; $f(X, t, \tau)$ – диференціальний закон розподілу вектора X ; $f(Y, t, \tau)$ – диференціальний закон розподілу вектора Y .

Виконавши певні перетворення, формулу (1) представимо у вигляді

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = H(X, t, \tau) - m_Y [H_Y(X, t, \tau)],$$

або

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = H(Y, t, \tau) - m_X [H_X(Y, t, \tau)],$$

де $H(X, t, \tau) = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(X, t, \tau) \log_2 f(X, t, \tau) dX$ –

апіорна ентропія вектора X ; $m_Y [H_Y(X, t, \tau)] =$

$$= - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(X, t, \tau, Y) \log_2 f(X, Y, t, \tau) dX dY - \text{усереднене}$$

за вихідними параметрами значення ентропії після одержання сигналів на виході; $f_Y(X, t, \tau)$ – умовний диференціальний закон розподілу вектора X при одержанні вектора Y .

При цьому отримуємо (Кочуров, 2003)

$$f_Y(X, t, \tau) = \frac{f(X, Y, t, \tau)}{f(Y, t, \tau)}.$$

При нормальному законі розподілу випадкових векторів на вході й виході ГІС у процесі управління територіями маємо

$$f(X, t, \tau) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(X - m_X)^2}{2\sigma_X^2} \right\}. \quad (2)$$

$$f(Y, t, \tau) = \frac{1}{\sigma_Y \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(Y - m_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right\}. \quad (3)$$

Далі знаходимо

де

$$R^{XX} = \begin{bmatrix} R_{11}^{XX} & \dots & R_{1m}^{XX} \\ R_{21}^{XX} & \dots & R_{2m}^{XX} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{m1}^{XX} & \dots & R_{mm}^{XX} \end{bmatrix}; \quad R^{YY} = \begin{bmatrix} R_{11}^{YY} & \dots & R_{1m}^{YY} \\ R_{21}^{YY} & \dots & R_{2m}^{YY} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{m1}^{YY} & \dots & R_{mm}^{YY} \end{bmatrix};$$

$$R^{XY} = \begin{bmatrix} R_{11}^{XX} & \dots & R_{1m}^{XX} & R_{11}^{XY} & \dots & R_{1m}^{XY} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{m1}^{XX} & \dots & R_{mm}^{XX} & R_{m1}^{XY} & \dots & R_{mm}^{XY} \\ R_{11}^{XY} & \dots & R_{1m}^{XY} & R_{11}^{YY} & \dots & R_{1m}^{YY} \\ R_{m1}^{XY} & \dots & R_{mm}^{XY} & R_{m1}^{YY} & \dots & R_{mm}^{YY} \end{bmatrix} -$$

кореляційні визначники, що відповідають кореляційним матрицям, складеним з кореляційних моментів

$$R_{\nu\mu}^{XX} = m[(X_\nu - m_{X_0})(X_\mu - m_{X_0})];$$

$$R_{v\mu}^{yy} = m[(Y_v - m_{Y_v})(Y_\mu - m_{Y_\mu})];$$

$$R_{v\mu}^{xy} = [m(X_v - m_{X_v})(X_\mu - m_{X_\mu})].$$

При незалежних компонентах вектора $X(t, \tau)$ маємо

$$R_{v\mu}^{xx} = \begin{cases} \sigma_0^2 & \text{при } v = \mu \\ 0 & \text{при } v \neq \mu \end{cases},$$

а ентропія вектора дорівнює

$$H(X, t, \tau) = \log_2 \sigma_1 \sqrt{2\pi e} + \dots + \log_2 \sigma_m \sqrt{2\pi e}.$$

Відомо, що ступінь зв'язку між випадковими процесами характеризується кореляційною функцією. Якщо вихідний вектор $Y(t, \tau)$ не пов'язаний із вхідним вектором $X(t, \tau)$, то $R_{v\mu}^{xy} = 0$; тобто кількість інформації, що над-

ходить у процесі управління, $I(X \rightarrow Y, t, \tau) = 0$.

При врахуванні всіх характеристик вектора $X(t, \tau)$ коефіцієнт кореляції $r_{xy}(t, \tau) \rightarrow 0$, отже, $I(X \rightarrow Y, t, \tau) \rightarrow \infty$. Для одномірного випадкового процесу формула (5) перетворюється у формулу

$$I(x_i \rightarrow y_i, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 [1 - r^2(t, \tau)],$$

де $r(t, \tau) = -\frac{R_{11}^{xx}(t, \tau)}{\sigma_x(t, \tau)\sigma_y(t, \tau)}$ – коефіцієнт кореляції.

Розглянемо окремі випадки одновимірної передачі інформації.

При запізнюванні відтворення

$$y(t, \tau) = x(t - \tau_3, \tau);$$

$$r(t, \tau) = -\frac{1}{\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int [x(t) - m_x][x(t - \tau_3) - m_x] f(x, y, t, \tau) dx dy,$$

або остаточно

$$r(t, \tau) = \frac{R(\tau_3)}{R(0)},$$

де $R(\tau_3)$ – кореляційна функція центрованої випадкової величини; $R(0) = \sigma^2$ – дисперсія.

Кількість інформації у цьому випадку дорівнює:

$$I(x \rightarrow y, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 \left[1 - \frac{R^2(\tau_3)}{R^2(0)} \right].$$

Оскільки $0 \leq R(\tau_3)/R(0) < 1$ при $\tau_3 > 0$, то $\infty > I(x \rightarrow y, t, \tau) \geq 0$.

ГІС в ЛЕМ спроможна надати скільки завгодно багато інформації про стан об'єкта, якщо вона представляє вихідний вектор $Y(t, \tau)$ за скільки завгодно малою затримкою τ_3 : при $\tau_3 \rightarrow 0$ $R(\tau_3) \rightarrow 0$ і, отже, $I(X \rightarrow Y, t, \tau) \rightarrow \infty$. ГІС в ЛЕМ практично не надає додаткової інформації про стан об'єкта дослідження, якщо вона представляє вихідний вектор $Y(t, \tau_3)$ з великою затримкою τ_3 : при $\tau_3 \rightarrow \infty$ $R(\tau_3) \rightarrow 0$ і, отже, $I(X \rightarrow Y, t, \tau) = 0$.

За наявності шумів $u(t, \tau)$ і нормального розподілу параметрів x, y маємо

$$y(t, \tau) = x(t, \tau) + u(t, \tau);$$

$$\sigma_Y^2(t, \tau) = \sigma_x^2(t, \tau) + \sigma_u^2(t, \tau);$$

$$r(t, \tau) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int (x - m_x)(y - m_y) f(x, y, t, \tau) dx dy =$$

$$= \frac{\sigma_x^2}{\sigma_x \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_u^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_u^2}{\sigma_x^2}}}.$$

Середня кількість інформації, яку можна отримати за наявності шумів, дорівнює

$$I(x \rightarrow y, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 (1 - r^2) = \frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma_x^2 + \sigma_u^2}{\sigma_u^2}.$$

Якщо точність переведення вхідного вектора $X(t, \tau)$ у вихідний вектор $Y(t, \tau)$ є невисокою (присутні помилки), так що $\sigma_u \gg \sigma_x$, то

$$\frac{\sigma_x^2 + \sigma_u^2}{\sigma_u^2} \rightarrow 1,$$

і отже, $I(X \rightarrow Y, t, \tau) \rightarrow 0$. ГІС в ЛЕМ спроможна надати скільки завгодно багато інформації про стан об'єкта за високої точності переведення вхідного вектора $X(t, \tau)$ у вихідний вектор $Y(t, \tau)$.

При $\sigma_u \gg \sigma_x$ $\frac{\sigma_x^2}{\sigma_u^2} + 1 \rightarrow \infty$ і, отже, $I(x \rightarrow y, t, \tau) \rightarrow \infty$.

Висновки. Таким чином, середня кількість інформації, що отримується в процесі ЛЕМ при використанні ГІС при нормальному законі розподілу параметрів і помилок, залежить від дисперсії помилок і точності ГІС, а також від ступеня зв'язку векторів X і Y та затримки відтворення. При законах розподілу вихідних параметрів і завад, які відрізняються від нормальних, середня кількість інформації, що отримується в процесі контролю, визначається за формулою (1).

Запропонована модель дозволяє оцінити зменшення ентропії системи (підвищити інформативність) управління територіями за рахунок впровадження ГІС. Упровадження ГІС у процес ЛЕМ, за розрахунками авторів, дозволяє зменшити ентропію системи до 50–65 %, що свідчить про необхідність упровадження ГІС у ЛЕМ.

Список використаних джерел

- Білявський, Г. О. (2005). Основи екології. Київ: Либідь.
 Бурачек, В.Г., Железняк, О.О., Зацерковний, В.І. (2011). Геоінформаційний аналіз просторових даних. Ніжин: ТОВ Видавництво "Аспект-Поліграф".
 Зацерковний, В.І., Тішаєв, І.В., Вірило, І.В., Демидов, В.К. (2016). Геоінформаційні системи в науках про Землю. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя.
 Зацерковний, В. І. (2012) Оцінка приросту інформації в процесі впровадження ГІС в управління територіями. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, 4 (61), 140-146.
 Красовский, А.А., Поспелов, Г.С. (1962) Основы автоматизации и технической кибернетики. Госэнергоиздат.
 Кочуров, Б.И. (2003). Экодиагностика и сбалансированное развитие. Учебное пособие. Москва: Маджента.
 Макаров, В.З., Новаковский, Б.А., Чумаченко, А.Н. (2002). Эколого-географическое картографирование городов. Москва: Научный мир.
 Одум, Ю. (1986). Экология. Москва: Мир.
 Грангшвили, И.В. (2003). Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. Москва: Наука.
 Понтягин, Л.С., Болтянский, В.Г., Гамкрелидзе, Р.В., Мищенко, Е.Ф. (1983). Математическая теория оптимальных процессов. Москва: Наука.
 Франчук, Г.М., Кравець, М.О. (2013). Оцінка екологічного стану каскадів Голосіївських ставків. *Наукоємні технології*, 1, 9-12.
 Шипулін, В.Д. (2012). Основні принципи геоінформаційних систем. Харків: ХНАМГ.
 Troll, C. (1939). Luftbildplan und Ökologische Bodenforschung. Z. Ges. Erdkunde. Bonn, 241-298.

Reference

- Bilyavsky, A.A. (2005). The basics of ecology. Kyiv: Lybid. [in Ukrainian]
 Burachek, V.G., Zheleznyak, A.A., Zatserkovnyi, V.I. (2011). Geoinformation analysis of spatial data. Nezhin LLC Publishing house "Aspect-Polygraph". [in Ukrainian]
 Franchuk, G.M. Portnoy, M.A. (2013). Assessment of the ecological state of the cascades of the Golosееvsky ponds. *Knowledge-intensive technology*, 1, 9-12. [in Ukrainian]
 Kochurov, B.I. (2003). Ecodiagnosics and balanced development. Moscow: Magenta. [in Russian]

Krasovsky, A.A., Pospelov, G.S. (1962). Fundamentals of automation and technical cybernetics. Gosenergoizdat. [in Russian]
 Makarov, V.Z., Novakovsky, B.A., Chumachenko, A.N. (2002). Ecological and geographical mapping of cities. Moscow: The scientific world. [in Russian]
 Odum, Yu. (1986). Ecology. Moscow: World. [in Russian]
 Pontryagin, L.S., Boltysky, V.G., Gamkrelidze, R.V., Mishchenko, E.F. (1983). The mathematical theory of optimal processes. Moscow: Science. [in Russian]
 Prangishvili, I.V. (2003). Entropy and other systemic laws: Issues of managing complex systems. Moscow: Science. [in Russian]

Shipulin, V.D. (2012). Basic principles of geographic information systems. Kharkov: KNAGH. [in Ukrainian]
 Troll, C. (1939). Luftbildplan und Ökologische Bodenforschung. Z. Ges. Erdkunde. Bonn, 241-298. [in German]
 Zatserkovnyi, V. I. (2012). Assessment of information growth in the process of implementing GIS in the management of territories. *Bulletin of the Chernihiv State Technological University*, 4 (61), 140-146. [in Ukrainian]
 Zatserkovnyi, V.I., Tishaev, I.V., Virshilo, I.V., Demidov, V.K. (2016). Geoinformation systems in earth sciences. Nizhyn: NSU Gogol. [in Ukrainian]
Надійшла до редколегії 07.08.19

V. Zatserkovnyi, Dr. Sci. (Tech.),
 E-mail: vitallii.zatsekovnyi@gmail.com;
 L. Plichko, PhD student,
 E-mail: plichkoL@ukr.net,
 Taras Shevchenko National University of Kyiv,
 Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
 O. Prylipko, PhD (Psychol.),
 E-mail: prylipko1964@bigmir.net,
 Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv,
 81 Lomonosova Str., Kyiv, 03189, Ukraine;
 O. Nikolaenko, Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher,
 E-mail: n-a@ukr.net,
 National Aviation University,
 1 Komarova Ave., Kyiv, 03058, Ukraine;
 T. Muzhanova, PhD (Public Admin.),
 E-mail: muzanovat@gmail.com,
 State University of Telecommunications,
 7 Solomyanska Str., Kyiv, 03680, Ukraine

SUBSTANTIATION OF THE APPROPRIATENESS OF APPLYING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS IN LANDSCAPE-ECOLOGICAL MONITORING

Modern cities are characterized by such negative effects of civilization as urban densification, the pollution of air, water, soil, increasing noise and vibration pollution level, heat islands, the impact of magnetic, electric, ionization fields, etc. There is an unprecedented speed and scale of using various natural resources and contaminating the environment with production and consumption wastes.

One of the efficient mechanisms of counteracting these negative effects is landscape-ecological monitoring (LEM) of the present urban ecological infrastructure (constructions and objects designed for protection, restoration and improvement of the natural environment) which is meant to provide the compensating resistance to the consequences of anthropogenic impact.

LEM is significant when developing the evidence-based urban environmental policy and optimizing the environmental management system.

Taking effective managerial decisions on the improvement of urban environmental situation requires complete and accurate information about basic natural conditions. The research focused on systematic gathering of data on an area mostly belongs to the field of landscape-ecological mapping.

The authors have substantiated the necessity of using geographic information systems (GIS) in LEM and presented a model of assessing information gain which can be obtained when applying GIS in LEM.

This model enables to assess the reduction of entropy (enhance information content) of LEM system by applying GIS. According to the authors' estimation, the introduction of GIS to LEM will enable to reduce entropy (uncertainty) of a system almost by half, that indicates the need of applying GIS in LEM.

Keywords: geographic information system, landscape-ecological monitoring, information content, geoinformation modeling.

B. Зацерковный, д-р техн. наук,
 E-mail: vitallii.zatsekovnyi@gmail.com;
 Л. Пличко, асп.,
 E-mail: plichkoL@ukr.net,
 Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
 УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
 А. Прилипко, канд. психол. наук,
 E-mail: prylipko1964@bigmir.net,
 Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,
 ул. Ломоносова, 81, г. Киев, 03189, Украина;
 О. Николаенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
 E-mail: n-a@ukr.net,
 Национальный авиационный университет,
 пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, 03058, Украина;
 Т. Мужанова, канд. наук по гос. управлению, доц.,
 E-mail: muzanovat@gmail.com,
 Государственный университет телекоммуникаций,
 ул. Соломенская, 7, г. Киев, 03110, Украина

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

Для современных городов характерны такие негативные последствия цивилизации, как уплотнение городской застройки; загрязнение воздуха, воды, почвы; растущий уровень шума и вибраций; "острова тепла"; влияние магнитных, электрических, ионизационных полей и т. п. Небывальными темпами растет объем использования различных природных ресурсов и масштабов загрязнения внешней среды отходами производства и потребления.

Одним из действенных механизмов снятия этих негативных последствий является ландшафтно-экологический мониторинг (ЛЕМ) состояния существующей экологической инфраструктуры городов (сооружений и объектов, предназначенных для охраны, воспроизводства и улучшения окружающей природной среды), которая призвана обеспечить декомпенсированное противодействие последствиям антропогенной нагрузки.

ЛЕМ необходим для разработки научно-обоснованной городской экологической политики и оптимизации системы природопользования. Для принятия эффективных квалифицированных управленческих решений по улучшению экологической ситуации городов нужна полная и достоверная информация об основных природных условиях. Исследования, направленные на системный сбор информации о территории, чаще всего относятся к сфере ландшафтно-экологического картографирования.

Обоснована необходимость применения в ЛЕМ геоинформационных систем (ГИС) и представлена модель оценки прироста информации, которую можно получить в процессе внедрения ГИС в ЛЕМ. Предложенная авторами модель позволяет оценить уменьшение энтропии системы (повысить информативность) процесса ЛЕМ за счет внедрения ГИС.

Ключевые слова: геоинформационная система, ландшафтно-экологический мониторинг, информативность, геоинформационное моделирование.

Наукове видання



ВІСНИК
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ГЕОЛОГІЯ
Випуск 1(88)

Комп'ютерна обробка статей – О. О. Козіонова

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"

Opinions, statements, accuracy of the quotations, economic and statistical data, terminology, proper names and other information are made on the responsibility of the authors. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit the submitted materials.

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, відповідної галузевої термінології, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали.



Формат 60x84^{1/8}. Ум. друк. арк. 12,3. Наклад 300. Зам. № 220-9666.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл1.
Підписано до друку 31.03.2020

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 72; тел./факс (38044) 239 31 28
E-mail: vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
<http://vpc.univ.kiev.ua>
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02