

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

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

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

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

Відповідальний за випуск О.І. Меньшов

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР**РЕДАКЦІЙНА
КОЛЕГІЯ**

В.А. Михайлов, д-р геол. наук, проф.

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

Іноземні члени редакційної колегії:

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

Адреса редколегії

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

Затверджено

Вченою радою ННІ "Інститут геології"
10 листопада 2020 року (протокол № 6)

Атестовано

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

Зареєстровано

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

**Засновник
та видавець**

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

Адреса видавця

б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601, Україна;
☎ (38044) 239 31 72, 239 32 22; факс 239 31 28

UDC 504+550+551+552+624

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

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

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

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

Chief publication manager O. Menshov

EDITOR-IN-CHIEF

EDITORIAL BOARD

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

Ukrainian Members:

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

Foreign members:

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

Address

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

Approved by the

Academic Council of the Institute of Geology
November 10, 2020 (Minutes # 6)

Certified by the

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

Certified by the

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

Founded and published by

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University", 2020
State Certificate # 1103 issued on 31.10.2002

Address

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

ЗМІСТ

ГЕОФІЗИКА

Вижва С., Онищук В., Онищук І., Рева М., Шабатура О. Геофізичні дослідження підтоплення територій міських агломерацій.....	6
Карпенко О., Соболев В., Миронцов М., Карпенко І. Аналіз впливу геологічних чинників на глибину зони проникнення фільтрату при первинному розкритті гранулярних колекторів за даними ГДС	16
Гурбанов В., Султанов Л. Результати петрофізичних досліджень відкладень продуктивної товщі північних нафтогазоносних площ Бакинського архіпелагу.....	22
Глоба Я., Глоба Р., Рева М., Вижва С. Інтерпретаційні можливості електричних полів джерел дискового типу	28
Вижва С., Соловйов І., Михалевич І., Круглик В., Лісний Г. Використання кількісних даних 3D сейсморозвідки для виявлення пасток вуглеводнів у межах північного борту Дніпровсько-Донецької западини.....	35
Пігулевський П., Шумлянська Л., Дубовенко Ю. Перші результати інтерпретації за сейсмотомографічним геотраверсом "Вінниця – Таганрог"	42

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Мізерна М., Оразбекова Г., Д'ячков Б., Мирошникова А., Зацерковний В. Моделювання магматичних рудних систем золоторудного родовища Східного Казахстану	49
--	----

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

Азімов О., Кураєва І., Трофимчук О., Злобіна К., Кармазиненко С. Моніторингова оцінка якості поверхневих вод у районах захоронення твердих побутових відходів.....	56
Малькова Я., Яковлев Є., Долін В. Еколого-техногенні закономірності формування розсолів Домбровського кар'єру	61
Распопіна С. Запаси органічного карбону в блоці "підстилка – ґрунт" соснової екосистеми Поліського регіону	68
Рокочинський А., Шевченко О., Волк П., Турченко В., Коптюк Р., Волк Л. Гідрогеологічна дія дренажу та дренажних систем зони Полісся у змінних кліматичних умовах	74

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

Вижва З., Демидов В., Вижва А. Статистичне моделювання даних у 3D області зі сферичною кореляційною функцією на прикладі Рівненської АЕС.....	85
Углицьких Є., Вижва С., Іванік О. Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні території Закарпаття за даними радарної інтерферометрії	94
Остроух О., Чомко Д., Остроух В., Підлісецька І. Використання засобів просторового аналізу і можливостей геоінформаційних систем для оцінки стану ґрунтових вод.....	100

CONTENTS

GEOPHYSICS

Vyzhva S., Onyshchuk V., Onyshchuk I., Reva M., Shabatura O. Geophysical study of flooding of urban conglomerates areas.....	6
Karpenko O., Sobol B., Myrontsov M., Karpenko I. Analysis of the influence of geological factors on the depth of the filtrate invaded zone at the primary disclosure of granular reservoirs according to the well-logging data.....	16
Gurbanov V., Sultanov L. Results of petrophysical studies of the productive stratum deposits of the Baku Archipelago northern oil and gas bearing areas	22
Hloba Y., Hloba R., Reva M., Vyzhva S. Interpretation possibilities of disc type sources electric fields	28
Vyzhva S., Solovyov I., Mihalevich I., Kruhlyk V., Lisny G. Use of quantitative data of 3D seismic exploration for detection of traps of hydrocarbons within the north side of the Dnieper-Donetsk Depression.....	35
Pigulevskiy P., Shumlianska L., Dubovenko Yu. First results of the seismic tomographic geotraverse "Vinnytsia – Taganrog" research.....	42

MINERAL RESOURCES

Mizernaya M., Orazbekova G., Dyachkov B., Miroshnicova A., Zatserkovnyi V. Modeling of ore-magmatic system of gold deposits in Eastern Kazakhstan	49
---	----

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

Azimov O., Kuraeva I., Trofymchuk O., Zlobina K., Karmazynenko S. Monitoring assessment of the surface water quality within the areas for the municipal solid waste disposal	56
Malkova Y., Yakovlev Y., Dolin V. Ecological and technological regularities of salt brines formations of Dombrovsky quarry	61
Raspopina S. The stocks of organic carbon in the block "litter – soil" of Polissia region pine ecosystems	68
Rokochinskiy A., Shevchenko O., Volk P., Turchenyuk V., Koptjuk R., Volk L. Hydrogeological action of drainage and drainage systems of Polissia zone in changing climatic conditions	74

GEOLOGICAL INFORMATICS

Vyzhva Z., Demidov V., Vyzhva A. The statistical simulation of dataset in 3D area with spherical correlation function on Rivne NPP example	85
Uglitskih E., Vyzva S., Ivanik O. Vertical displacement monitoring of Zakarpattia region territory based on radar interferometry data	94
Ostroukh O., Chomko D., Ostroukh V., Pidlisetska I. Use of spatial analysis tools and capability of geoinformation systems for assessment of the state of underground waters	100

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОФИЗИКА

Выжва С., Онищук В., Онищук И., Рева Н., Шабатура А. Геофизические исследования подтопления территорий городских агломераций	6
Карпенко А., Соболев В., Миронцов Н., Карпенко И. Анализ влияния геологических факторов на глубину зоны проникновения фильтрата при первичном вскрытии гранулярных коллекторов по данным ГИС	16
Гурбанов В., Султанов Л. Результаты петрофизических исследований отложений продуктивной толщи северных нефтегазоносных площадей Бакинского архипелага	22
Глоба Я., Глоба Р., Рева Н., Выжва С. Интерпретационные возможности электрических полей источников дискового типа	28
Выжва С., Соловьев И., Михалевич И., Круглик В., Лесной Г. Использование количественных данных 3D сейсморазведки для поиска ловушек углеводородов в пределах северного борта Днепровско-Донецкой впадины	35
Пигулевский П., Шумлянская Л., Дубовенко Ю. Первые результаты интерпретации сейсмотомографического геотраверса "Винница – Таганрог"	42

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Мизерная М., Оразбекова Г., Дьячков Б., Мирошникова А., Зацерковный В. Моделирование магматогенных рудных систем золоторудных месторождений Восточного Казахстана	49
---	----

ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Азимов А., Кураева И., Трофимчук А., Злобина Е., Кармазиненко С. Мониторинговая оценка качества поверхностных вод в районах захоронения твердых бытовых отходов	56
Малькова Я., Яковлев Е., Долин В. Эколого-техногенные закономерности формирования рассола Домбровского карьера	61
Распопина С. Запасы органического углерода в блоке "подстилка – почва" сосновых экосистем Полесского региона	68
Рокочинский А., Шевченко А., Волк П., Турченко В., Коптюк Р., Волк Л. Гидрогеологическое действие дренажа и дренажных систем зоны Полесья в изменчивых климатических условиях	74

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

Выжва З., Демидов В., Выжва А. Статистическое моделирование данных в 3D области со сферической корреляционной функцией на примере Ровенской АЭС	85
Углицких Е., Выжва С., Иваник Е. Мониторинг вертикальных смещений территории Закарпатья по данным радарной интерферометрии	94
Остроух О., Чомко Д., Остроух В., Подлесецкая И. Использование средств пространственного анализа и возможностей геоинформационных систем для оценки состояния грунтовых вод	100

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

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

ГЕОФІЗИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ МІСЬКИХ АГЛОМЕРАЦІЙ

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

Присвячено висвітленню особливостей застосування геофізичних методів досліджень при вивченні підтоплення територій міських агломерацій. Розглянуто завдання, що ставляться при спеціалізованих дослідженнях підтоплення територій, комплекси та особливості геофізичних методів для їхнього вирішення. Виділено три етапи спеціалізованих досліджень підтоплення територій: рекогносцирувально-методичний, детальний та моніторинговий. Визначено принципи геофізичного картування стану земель шляхом їхнього геоелектричного погоризонтного вивчення та розроблено геолого-геофізичні моделі верхньої частини розрізу, що є основою оцінки території, схильної до підтоплення.

Для прикладу наведено результати геофізичних досліджень, виконаних у межах ділянки підтоплення на території Експо-центру України, і побудовано відповідні геолого-геофізичні моделі верхньої частини розрізу.

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

Ключові слова: підтоплення, мікроелектрозондування, верхня частина розрізу, геолого-геофізичні моделі, інженерно-геофізичні дослідження, питомий електричний опір.

Постановка проблеми. Проблеми техногенної й природної безпеки торкаються життєвих інтересів кожної людини, адже ми живемо і працюємо в техногенно-природному середовищі, своєю діяльністю свідомо або не свідомо втручаємося у цілісну систему і гармонію природи. Компроміс, а частіше – конфронтація, між техногенною сферою і природним середовищем нині є тією глобальною проблемою, від розв'язання якої залежить майбутнє кожної країни. Міські території привертають увагу через необхідність оцінки ризику прояву небезпечних природних і природно-техногенних явищ і процесів, що становлять загрозу для безпечного проживання людини та функціонування об'єктів господарської інфраструктури. Для території міських агломерацій найбільш суттєвими є такі процеси, як сучасні повільні тектонічні (вертикальні й горизонтальні) та сейсмічні рухи земної кори, активізація рухів по тектонічних розломах, зсувні, ерозійні та суфозійно-просадкові процеси, осідання ґрунту внаслідок ущільнення порід підвалин споруд, підтоплення та заболочування тощо.

Спорудження в Україні великих меліоративних і гідротехнічних систем, зарегульованість поверхневого стоку, дія техногенних факторів призвели до інтенсивного розвитку процесів підтоплення земель. Розвитку цих процесів сприяє повна зарегульованість Дніпра, що спричиняє підпір горизонту ґрунтових вод в середньому до 6–10 м. На малих і середніх річках побудовано більше 26500 водосховищ і ставків. Це також зумовлює середній підпір горизонту ґрунтових вод до 2–5 м.

Одним із найбільш небезпечних проявів шкідливої дії вод в Україні стали катастрофічні паводки, повені та підтоплення територій. Ці проблеми є притаманними майже для всієї території України. Саме паводки і підтоплення завдають найбільше збитків людям, економіці та навколишньому середовищу. У сучасних умовах інтенсивність змиву ґрунтів у процесі водної ерозії майже в 10 разів перевищує темпи ґрунтоутворення. Шкідливої дії водної

ерозії зазнають понад 8 млн га орних земель. Слід зазначити, що на еродованих землях утрачається від 10 до 50 % урожаю.

Природне і техногенне підтоплення земель охоплює площі близько 146 тис. км². Від підтоплення страждає населення понад 500 міст і селищ міського типу та 1127 сільських населених пунктів України. Підтоплені площі становлять до 27 % загальної площі держави (Гурицький, 2013; Ромащенко та Савчук, 2001; Семенчук та ін., 2018). Підтоплення територій провокує активізацію таких процесів, як зсуви, просідання ґрунту тощо. Причинами підтоплення є гідрогеологічні умови, нераціональне зрошення, втрати у водонесучих мережах, гірничодобувні роботи. Особливу небезпеку створює застосування так званої "мокрої консервації" шахт.

Для прикладу, у зоні впливу Північно-Кримського каналу підтоплення зазнають 96 тис. га орних земель, Каховської зрошувальної системи – 5,1 тис. га, Каланчацької – 9,1 тис. га. Унаслідок фільтрації води в зоні дії Краснознам'янського каналу підтоплено 33 населені пункти та майже 34 тис. га сільгоспугідь. Понад 50 % зрошуваних земель суттєво погіршили свою природну родючість через підтоплення, засолення та солонцювання.

Під терміном "підтоплення" розуміють комплекс явищ, що призводять до стійкого підвищення рівня ґрунтових вод (РГВ) або вологості порід зони аерації до критичних рівнів, які ускладнюють або виключають нормальну експлуатацію народногосподарських об'єктів і сільськогосподарське виробництво. Безперечно, що ці явища характерні переважно для освоєних територій.

Об'єктом картування при оцінці ступеня підтоплення територій є породи, які становлять гідродинамічну зону активного водообміну до першого місцевого або локального водотриву. Основною характеристикою породи, з точки зору проблеми підтоплення, слід вважати її властивість пропускати і віддавати воду, показником якої є коефіцієнт фільтрації (Шестаков, 1979). Основним критерієм

при віднесенні території до категорії підтоплених нині є глибина залягання рівнів ґрунтових вод – критична глибина (*Методические...*, 1984). За ступенем підтоплення території поділяються на такі типи: території, підтоплені в природних умовах; території, підтоплені під впливом техногенної дії; території, потенційно підтоплювані й не підтоплювані.

Підтоплення докорінно змінює геоecологічні, механічні, фізичні, хімічні, гігієнічні параметри геологічного середовища (ГС). При цьому виявляються такі зміни його параметрів:

1. Погіршення геомеханічних, водно-фізичних властивостей дисперсних ґрунтів (перш за все лесових і лесово-суглинкових, що поширені на 65 % території України).

2. Активізація небезпечних екзогенних геологічних процесів або ініціювання нових (зсувів, просідань, тиксо-тропних перетворень ґрунтів, карсту, суфозії тощо).

3. Зниження несучої здатності та сейсмостійкості внаслідок наближення РГВ до фундаментів споруд із ризиком пливунних перетворень лесових, лесово-суглинкових та інших водонасичених ґрунтів.

4. Зниження захисної здатності ландшафтів і ґрунтів за рахунок зменшення потужності зони аерації, погіршення сорбційної здатності ґрунтів і прискорення міграції забруднювачів у ґрунтові води.

5. Зміна гідрогеохімічного складу підземних вод, зростання їхньої агресивності під впливом порушення рівноваги в системі "мінеральний скелет – вода".

Застосування методів геофізики з метою вивчення верхньої частини розрізу (у тому числі й процесів підтоплення) вимагає створення спеціальної технології польових досліджень за допомогою польових мікроустановок і відповідної методики інтерпретації даних.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Існує низка публікацій, присвячених вивченню підтоплення земель (*Вижва, 2004; Вижва та ін., 2007, 2018; Гурицький, 2013; Методические...*, 1984; *Онищук та Рева, 2004; Ромащенко та Савчук, 2001; Семенчук та ін., 2018; Vyzhva et al., 2019; Tyutyunnik et al., 2004*), проте систематичні спеціалізовані геофізичні дослідження, а тим більше геофізичний моніторинг практично не проводяться. В основному, за можливості, використовуються деякі матеріали геофізичних зйомок, раніше виконаних на площі з метою геологічного картування та пошуків родовищ корисних копалин. Слід зазначити про вкрай незначну кількість публікацій на дану тему з практичними прикладами застосування геофізичних методів для вивчення підтоплення.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Стаття присвячена висвітленню особливостей застосування геофізичних досліджень підтоплення територій міських агломерацій. Більшість досліджень підтоплення виконувалась прямими гідрогеологічними методами шляхом масового буріння свердловин з визначенням глибини до рівня ґрунтових вод. Слід підкреслити, що геофізичні дослідження дозволяють визначити будову і створити геолого-геофізичні моделі верхньої частини розрізу ділянок підтоплення. Безперечно, такі дослідження потребують підвищеної точності польових геофізичних вимірювань, застосування статистичних методів обробки та нових підходів до інтерпретації польових геофізичних даних.

Мета досліджень – висвітлення особливостей геофізичних досліджень при вивченні підтоплення територій. Наведено результати комплексних геофізичних досліджень верхньої частини розрізу урбанізованої території підтоплення – Експоцентру України в Києві.

Завдання і комплекс геофізичних досліджень підтоплення територій. Геофізичні методи застосовуються для вивчення гідрогеологічних та інженерно-геологічних умов ділянок підтоплення, впливу їх на екологічну обстановку, об'єкти господарської інфраструктури. Об'єктивна оцінка підтоплення територій потребує вирішення цілої низки завдань. Основними з них є: визначення будови верхньої частини розрізу – складу, стану, властивостей, умов залягання та геометричних параметрів окремих горизонтів гірських порід, оцінка їхньої проникності, водонасичення і режиму ґрунтових вод. Вирішення цих завдань разом із даними про кліматичні та гідрологічні умови району, матеріалами про техногенні навантаження та історію розвитку підтоплення слугують основою для їхнього прогнозу.

Основна увага при цьому звертається на детальні екогеофізичні дослідження верхньої частини розрізу (ВЧР) – приповерхневої частини геологічного середовища потужністю десять, рідше двадцять метрів. Вона включає ґрунти, гірські породи, поверхневі, ґрунтові та підземні води, екзогенні фізико-геологічні явища (зсуви, карст тощо). ВЧР найбільшою мірою зазнає впливу екзогенних (атмосферних, поверхневих) і техногенних (фізико-хімічних, енергетичних) процесів. Верхня частина розрізу часто характеризується екстремальним проявом як природних (різкою геологічною та петрофізичною неоднорідністю у просторі та часі), так і техногенних (максимальним проявом різноманітних штучних фізичних полів) процесів. Особливістю верхньої частини геологічного середовища, що зазнає значних техногенних навантажень, є яскраво виражена залежність усіх його характеристик від координат точок спостережень – властивості і стан ґрунтів та гірських порід помітно змінюються від точки до точки як по латералі, так і по вертикалі. Різко змінюється у просторі й часі поведінка різних геофізичних полів.

Прогнозування підтоплення базується на вивченні локальних водотривів і зволоженості порід, що знаходиться відображення у вимірних геофізичних полях. Застосування геофізичних досліджень дозволяє обстежити великі площі за детальності спостережень, яка недоступна для прямих методів інженерно-геологічних вишукувань з використанням буріння великої кількості свердловин. Вони дешевші за прямі методи і можуть бути виконані за коротший термін. Завдяки всебічному аналізу досліджуваної системи і масовому характеру спостережень геофізична інформація найбільш повно забезпечує можливість моделювання, яке є необхідним елементом інженерно-геологічного моніторингу процесів підтоплення.

Моніторингові інженерно-геофізичні дослідження при вивченні підтоплення призначені для натурного спостереження за змінами геологічного середовища в зоні їхнього розвитку. Отримані геофізичні матеріали використовуються для прийняття науково-технічних рішень на проведення оптимальних захисних інженерно-технічних заходів. Необхідність та обов'язковість спеціалізованих геолого-геофізичних досліджень у районі підтоплення територій з метою прогнозування імовірних геоecологічних змін доквілля впливає із численних прорахунків в обґрунтуванні будівництва та експлуатації різних природно-техногенних систем.

Слід зазначити, що нехтування організацією моніторингових інженерно-геофізичних та екогеофізичних досліджень зсувонебезпечних територій підвищує ризики втрати несучої здатності, родючості сільськогосподарських угідь і заболочування території.

При вивченні підтоплення територій геофізичні дослідження мають такі специфічні особливості:

1. Вивчення підтоплень геологічного середовища – порівняно новий напрям у природознавстві, який базується на використанні даних гідрогеології, інженерної геології, ґрунтознавства, меліорації, геохімії, геоєкології тощо. Для геофізичних методів, що традиційно застосовувались і застосовуються для вивчення глибоких і досить глибоких горизонтів (об'єктів) – дослідження верхньої частини геологічного розрізу (включаючи ґрунти), а в кінцевому рахунку підтоплень і забруднень земель – є досить складною та незвичною проблемою.

2. Об'єктом вивчення служить верхня частина розрізу – геологічне середовище, яке має свою структуру, речовинно-літологічний склад, петрофізичні й водно-фізичні особливості. При цьому постійно змінюються його геофізичні властивості.

3. Для вирішення нових для геофізики завдань необхідно отримувати і вивчати різноманітну інформацію про особливості верхньої частини розрізу – виконувати її розчленування на окремі шари, включаючи тонкі ґрунтові горизонти, простежувати їх у плані й на глибину, визначати їхні геофізичні параметри. Дуже важливими є також дані про положення РГВ і про його зміни в часі. Це вимагає широкого застосування польових мікроустановок, нових геофізичних методів, статистичних способів обробки інформації та тісної ув'язки даних різних методів досліджень.

4. Інформативні аномалії спостерігаються на фоні досить високого рівня різних завад, що тягне за собою, з одного боку, необхідність виконання великої кількості високоточних вимірювань, а з іншого – потребує гнучкого комплексування геофізичних методів з інженерно-геологічними та гідрогеологічними дослідженнями.

5. Застосовується досить густа мережа геофізичних спостережень, яка відповідає масштабу 1 : 5 000 – 1 : 10 000 і визначається конкретною геолого-геофізичною обстановкою району робіт і поставленими завданнями.

6. Спостереження виконуються в максимально стислі терміни, щоб уникнути похибок, викликаних сезонними змінами РГВ.

7. Під час моніторингових досліджень перший цикл спостережень виконується в період найвищого сезонного РГВ, а наступні – в аналогічні періоди. Для надійного прогнозування розвитку процесів підтоплення необхідно проводити щонайменше три цикли спостережень.

8. Необхідно виконувати комплексний аналіз усієї геолого-геофізичної інформації з тісною ув'язкою матеріалів різних геофізичних та інженерно-геологічних методів.

Виділяють три етапи досліджень підтоплення території: рекогносцирувально-методичний, детальний та моніторинговий. На рекогносцирувально-методичному етапі досліджень проводиться спеціалізована переінтерпретація матеріалів раніше виконаних геофізичних, гідрогеологічних та інженерно геологічних досліджень, виконуються дистанційні геофізичні зйомки (радіолокаційна, радіотеплова тощо) та комплексні геофізичні спостереження на окремих профілях. Залежно від поставлених завдань дистанційні методи дозволяють здійснити або узагальнене інтегральне обстеження місцевості та аналіз прояву регіональних факторів, або деталізацію окремих ділянок з метою визначення зон розвитку процесів підтоплення. На основі дистанційних зйомок і ретроспективної інформації щодо досліджуваної території створюється перша наближена модель підтоплення території, яка надалі конкретизується і уточнюється геофізичними методами. За матеріалами геофізичних досліджень на окремих профілях визначаються загальні геофізичні особливості району робіт, ефективність різних геофізичних методів і розробляється їхній раціональний комплекс для проведення детальних робіт.

На етапі детальних досліджень проводяться дослідження раціональним комплексом геофізичних методів за системою профілів. За матеріалами цих досліджень з урахуванням усієї геолого-гідрогеологічної інформації вирішуються задачі, поставлені в технічному завданні, визначаються геофізичні параметри та геолого-геофізичні моделі підтоплених ділянок, даються рекомендації щодо прийняття захисних інженерно-технічних рішень. Аналіз цих даних дозволяє зробити також вибір характерних (ключових) профілів і точок для організації моніторингових спостережень.

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

Для вирішення завдань, пов'язаних з вивченням процесів підтоплення на детальному етапі, раціональний комплекс мікрогеофізичних методів включає: мікроелектрозондування (МЕЗ), мікроелектрозондування способом викликання поляризації (МЕЗ-ВП), резистивиметрію поверхневих і ґрунтових вод (РПГ), сейсморозвідку кореляційним методом заломлених хвиль (КМЗХ) у модифікації мікросейсморозвідки (МСЗ). Основою геофізичного комплексу є мікроелектрозондування. Його суть полягає у збільшенні частоти зміни розносів лінії живлення (у три рази порівняно зі стандартною). Крім того, початковий рознос лінії живлення АВ/2 зменшено до 0,3 м, що призвело до продовження кривої електрозондування на порядок на білогарифмічному бланку в бік зменшення глибин досліджень і більш чіткого окреслення її особливостей. Ці заходи дозволили підвищити детальність геоелектричного розшарування ВЧР, виділяти 2–3 геоелектричні горизонти в межах ґрунтового профілю, що було неможливо при застосуванні стандартних вертикальних електричних зондувань.

Об'єктами спостережень МЕЗ є площі підтоплених земель та інтенсивних змін ґрунтів, замкнені пониження (поди), а також меліоровані землі, переважно підтоплені. Крім цього, при вивченні техногенного забруднення середовища деталізаційні роботи виконуються в межах житлової забудови міст і сіл, у районі промислових і тваринницьких комплексів, відстійників, очисних споруд, водоймищ тощо. За матеріалами МЕЗ здійснюється погоризонтне, об'ємне вивчення верхньої частини розрізу, у тому числі й малопотужних ґрунтових горизонтів. На основі отриманої інформації вирішуються задачі картування підтоплень і техногенних забруднень ВЧР, геоелектричної типізації ґрунтів і створюються геоелектричні моделі.

За допомогою МЕЗ-ВП детально вивчається горизонт ґрунтових вод, а також материнські породи, які підстилають ґрунтовий профіль. Зважаючи на значні затрати праці (економічну ефективність), МЕЗ-ВП застосовуються в невеликих обсягах на окремих профілях як деталізаційні (допоміжні) до методу МЕЗ.

За допомогою резистивиметрії поверхневих і ґрунтових вод виконується опробування всіх свердловин, криниць і водойм на території досліджень з метою оцінки мінералізації ґрунтових вод.

В останній час комплекс цих методів доповнюється георадарним методом. Георадарні дослідження виконуються на окремих профілях, як деталізаційні (допоміжні) до методу МЕЗ і використовуються для контролю положення рівня ґрунтових вод.

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

Основне завдання сейсморозвідувальних робіт полягає у визначенні глибини залягання рівня ґрунтових вод. У зв'язку із тим, що на ділянках підтоплення переважають мікросхаруваті структури, використовувались установки сейсмозондувань. Сейсмометричні дослідження виконуються кореляційним методом заломлених хвиль (КМЗХ) з використанням як поздовжніх, так і поперечних хвиль. Метод КМЗХ ґрунтується на реєстрації та простеженні (кореляції) перших і наступних вступів поздовжніх, а також поперечних заломлених хвиль. Сучасний рівень систем збору та реєстрації сейсмічних даних і можливості систем обробки та інтерпретації сейсмометрії дозволяють застосовувати просторово або тривимірну зйомку.

Розроблено технологію комплексної обробки мікрогеофізичних даних, яка включає основні етапи: збір та аналіз попередніх геолого-гідрогеологічних даних; якісну інтерпретацію даних польових досліджень; кількісну інтерпретацію даних польових досліджень; статистичну обробку та визначення кореляційних залежностей між гідрогеологічними (проникність, РГВ, засолення, мінералізація) і геофізичними параметрами; гідрогеологічну інтерпретацію, аналіз та узагальнення комплексних даних. Основними перевагами даної технології є експресність, економічна ефективність, об'єктивність, можливість визначення у польових умовах великої кількості параметрів, що контролюють стан ґрунтів і порід ВЧР.

Геолого-геофізичні моделі верхньої частини розрізу та принципи геоелектричного картування підтоплення земель. Отримана в результаті виконаних мікрогеофізичних досліджень інформація про будову верхньої частини розрізу (до глибини 10 м), у тому числі й тонких приповерхневих шарів (ґрунтів), дозволяє вирішувати широке коло різних завдань. Одні із них – вивчення ґрунтів, причому на відміну від стандартних методів їхнього картографування за допомогою геофізичних методів визначаються геофізичні параметри ґрунтів, а також порід зони аерації й першого від поверхні водоносного горизонту. Подібні геофізичні дані суттєво доповнюють і розширюють відомості про ґрунти, роблять їх більш інформативними і достовірними, дозволяють вивчати їх з більшою детальною розчленуванням (Вижва та ін., 2007; Онищук та Рева, 2004; Tyutyunniketal., 2004).

Вивчення верхньої частини розрізу – досить складне завдання, зважаючи на строкатість умов залягання ґрунтів та їхню значну мінливість. Тому для геофізичного картування підтоплення було розроблено спеціальну методику, в основі якої лежить принцип погоризонтного вивчення ВЧР (Онищук та Рева, 2004). Особливість цієї методики полягає в детальному розчленуванні ВЧР, включаючи ґрунтові горизонти. З цією метою будується комплект погоризонтних карт питомих електричних опорів в інтервалах глибин, що відповідають розвитку основних ґрунтових горизонтів і материнських порід. Ці інтервали, які можуть бути різними, але характерними для певного регіону, визначаються завдяки використанню параметричних матеріалів (Онищук та Рева, 2004). Для Лісостепової зони Придніпров'я та Київського Полісся найбільш інформативними виявились інтервали глибин: до 1,2 м; 1,2–3,5 м; 3,5–10 м. Геофізичні параметри

цих інтервалів є основою побудови геолого-геофізичних моделей верхньої частини розрізу з метою вивчення підтоплення.

Для побудови геолого-геофізичних моделей (ГМ) ВЧР і геоелектричного картування підтоплення використовуються матеріали МЕЗ і МЕЗ–ВП. На рис. 1 і 2 наведено розподіли питомого опору та відносного комплексного параметра залежно від стану (зволоння, оглеєння, засолення тощо) ґрунтів і порід ВЧР (Онищук, 2005).

При складанні карт геолого-геофізичних моделей ВЧР з метою вивчення підтоплення враховується, що вони повинні відображати особливості геолого-гідрогеологічної будови і ґрунтово-меліоративних умов верхньої десятиметрової частини розрізу (яка має вирішальний вплив на формування процесу підтоплення), уміщувати інформацію по всіх горизонтах, що вивчаються. Крім цього, виділені моделі мають бути уніфікованими, що дозволить використовувати ці дані при вивченні різних природних обстановок.

З метою характеристики горизонтів, які становлять ВЧР, вони розділяються на групи, що позначені цифрами арабськими і римськими, а також буквами. Їхне сполучення використовується для позначення (кодування) виділених геоелектричних моделей ВЧР (Онищук та Рева, 2004; Онищук, 2005). Літери, які стоять у лівій частині позначення моделей, характеризують породи нижнього горизонту (інтервал 3,5–10 м); римська цифра – материнські породи та ґрунти середнього горизонту (інтервал 1,2–3,5 м); арабська цифра – ґрунтові горизонти до глибини 1,2 м. Арабська цифра відсутня, коли ґрунти і породи верхнього і середнього горизонтів не відрізняються за опором.

Згідно з розробленою класифікацією області розповсюдження ґрунтів, які характеризуються моделями А–І–0 і Б–І–0, зіставляються з ділянками, складеними товщею майже непроникних порід, зокрема ґрунтами, перезволоженими торф'яно-болотними, засоленними, несприятливими для меліорації. Це головним чином низинні болота з природно високим положенням РГВ, які належать до підтоплених земель. ґрунти, які характеризуються моделями А–І, Б–І, Б–ІІ–1, приурочені до ділянок розповсюдження дуже слабопроникних утворень, у тому числі до заболочених, перезволожених і засоленних ґрунтів. Землі малородючі, інтенсивно підтоплені й несприятливі для меліорації. ґрунти, які характеризуються моделями А–І–4 і Б–І–4, приурочені до підтоплених забудованих територій, покритих шаром насипного ґрунту.

Моделі А–ІІ і Б–ІІ відповідають ділянкам незначно підтопленням або потенційно підтопленням, які складені слабопроникними ґрунтами і водовмісними породами, що підстилаються водотривом. Землі орні, у деяких випадках – перезволожені, що потребують осушувальної меліорації.

Області розповсюдження моделей А–ІІІ, Б–ІІІ, В–ІІІ більшою мірою, а також моделей А–ІV, Б–ІV, В–ІV розглядаються як ділянки непідтоплені, з родючими чорноземними ґрунтами.

Моделі В–V, Г–V, Д–VI приурочені: а) до підвищень рельєфу денної поверхні (землі малозволожені, які потребують зрошення); б) до алювіально-делювіальних пісків і піщаних відкладів різною мірою зволожених.

Аналіз карт електричних опорів, РГВ і ГМ ВЧР, дозволяє зробити висновок, що центральна частина Національного виставкового комплексу "Експоцентр України" (НKEУ) перебуває в підтопленому стані, і лише на південному сході й північному заході території у ВЧР суттєво переважають проникні піщані відклади з підвищеним електричним опором. Ця територія найменше схильна до підтоплення.

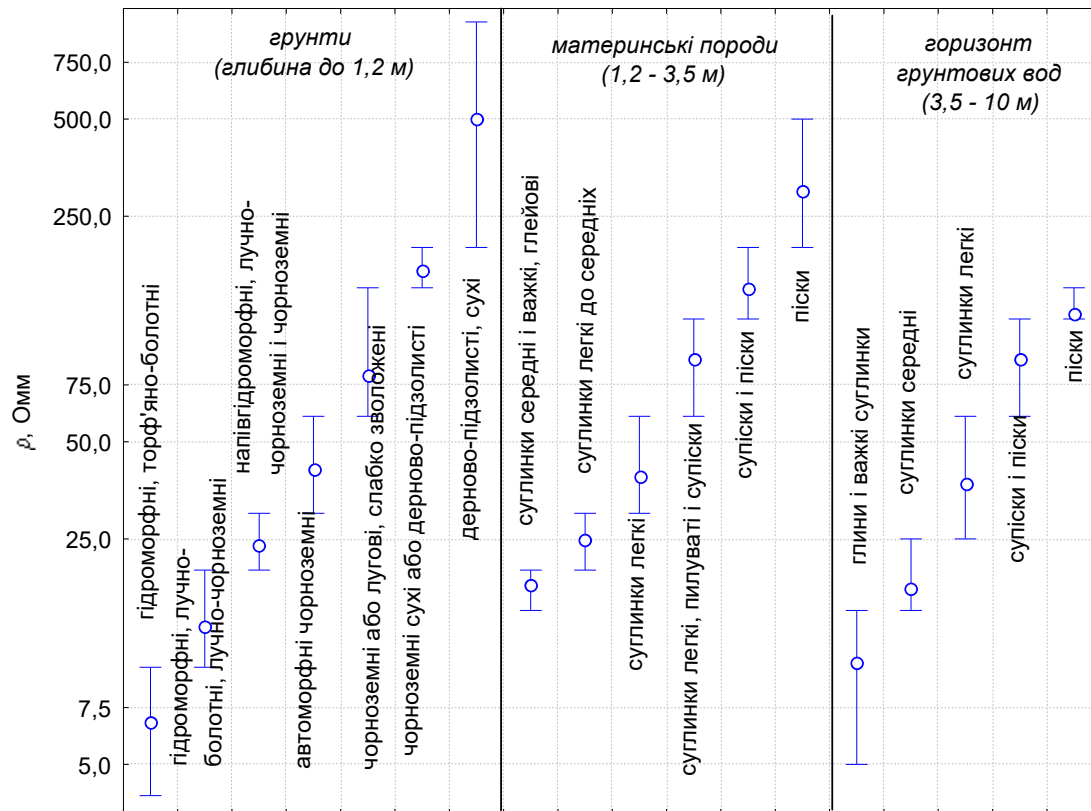


Рис. 1. Розподіл питомого електричного опору ρ ґрунтів і порід ВЧР

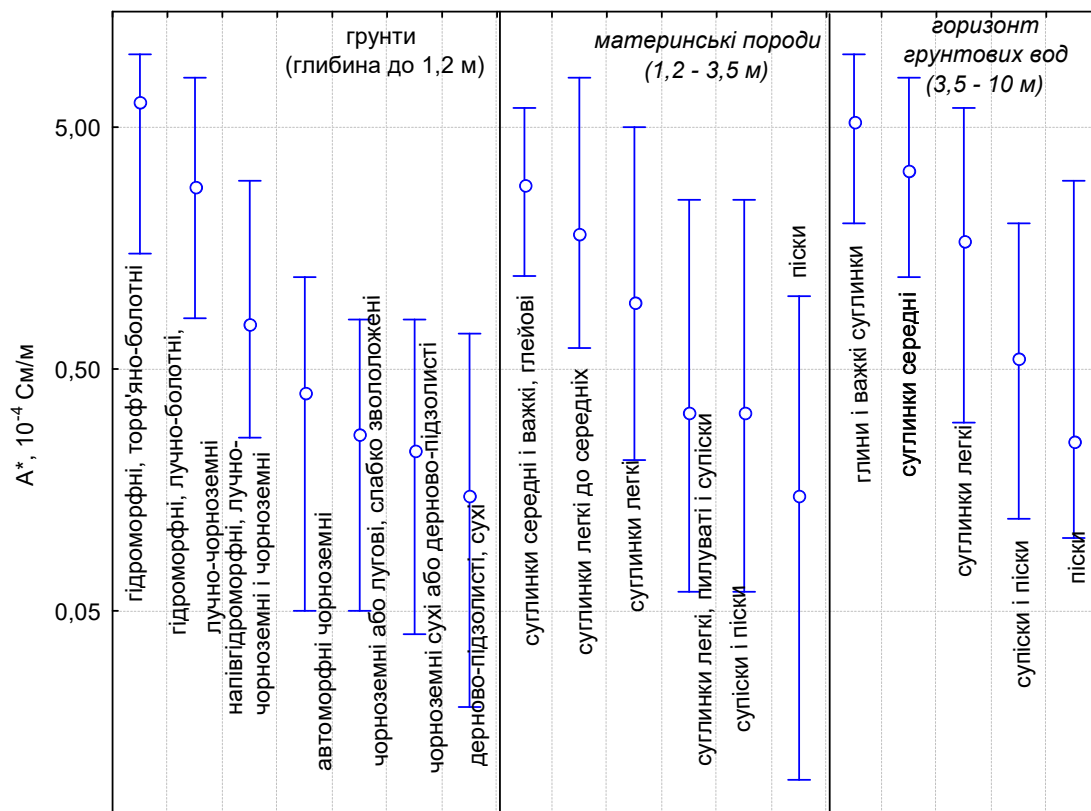


Рис. 2. Розподіл відносного комплексного параметра A^* ґрунтів і порід ВЧР

Експериментальні дослідження. Для прикладу наведемо результати геофізичних досліджень із вивчення підтоплення на урбанізованій території НКЕУ. Територія належить до Поліської низини (генетично – це моренно-

зандрова рівнина). У зв'язку із широким розповсюдженням слабопроникних порід у ВЧР вона досить сприятлива для формування підтоплення земель.

На території НКЕУ важливу роль відіграють такі техногенні фактори підтоплення, як інфільтраційні втрати з водогінно-каналізаційних систем, ліквідація природних дрен (балок), створення асфальтових покриттів тощо.

Значне збільшення вологості глинистих порід приводить до їхнього набухання. Унаслідок цього відбувається неоднорідна деформація ґрунтів, просадка фундаментів будівель, зменшення їхньої експлуатаційної надійності. На території НКЕУ, у роки підвищеної водності, ґрунтові води затоплюють підвали павільйонів на декілька десятків сантиметрів. Спостерігаються періодичні підтоплення підвалів сільськогосподарських павільйонів і саду. Із 1951 р. по 2019 р. рівень ґрунтових вод піднявся тут на 4–9 м.

Для вивчення підтоплення на території Експоцентру України комплекс досліджень включав мікроелектрозондування (МЕЗ), сейсморозвідку кореляційним методом заломлених хвиль (КМЗХ) у модифікації мікросейсмондувань (МСЗ) і буріння неглибоких параметричних свердловин.

За результатами сейсмондувань і неглибоких свердловин побудована карта глибин до рівня ґрунтових

вод (рис. 3). На основі отриманої геолого-геофізичної інформації охарактеризований кожний з виділених геоелектричних горизонтів, розташованих в інтервалі глибин відповідно: 0–1,2 м; 1,2–3,5 м; 3,5–10 м. Наводяться відомості про літологічний склад порід, ступінь їхньої зволоженості (водонасиченості) і проникності, межі зміни параметрів ρ і K_f .

На карті питомих електричних опорів ґрунтів в інтервалі глибин 0–1,2 м (рис. 4) виділяються області підвищених і високих значень ρ (від 60 до 500 Ом·м), які відповідають неводонасиченим проникним підзолистим ґрунтам, піскам і супіскам. Лише в районі саду, де потужність зони аерації невелика, опір зменшується до 30–60 Ом·м, і це свідчить про наявність тут водонасичених супісків і суглинків легких.

В інтервалі глибин 1,2–3,5 м на карті електричних опорів порід (рис. 5) мінімуми ρ займають уже значно більшу площу й електричні опори зменшуються до 17–20 Ом·м, що свідчить про водонасиченість порід у цих зонах.

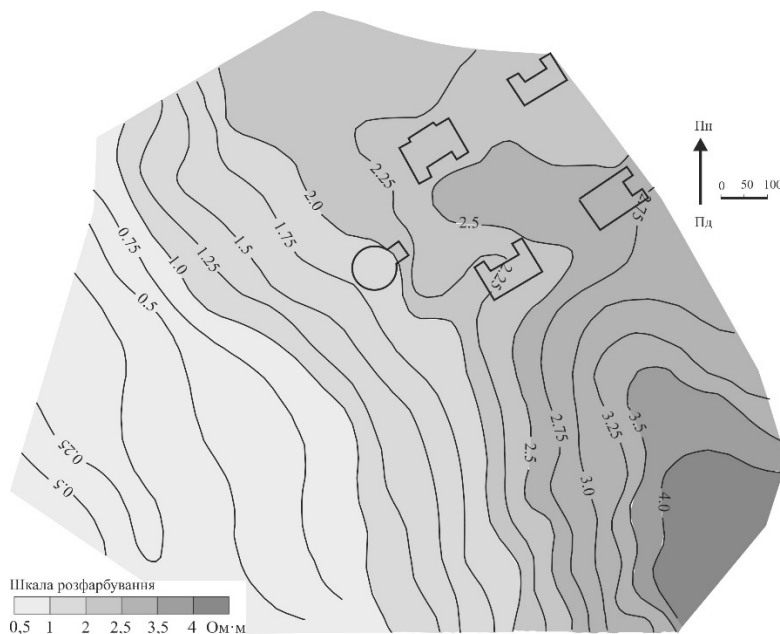


Рис. 3. Карта глибин до рівня ґрунтових вод

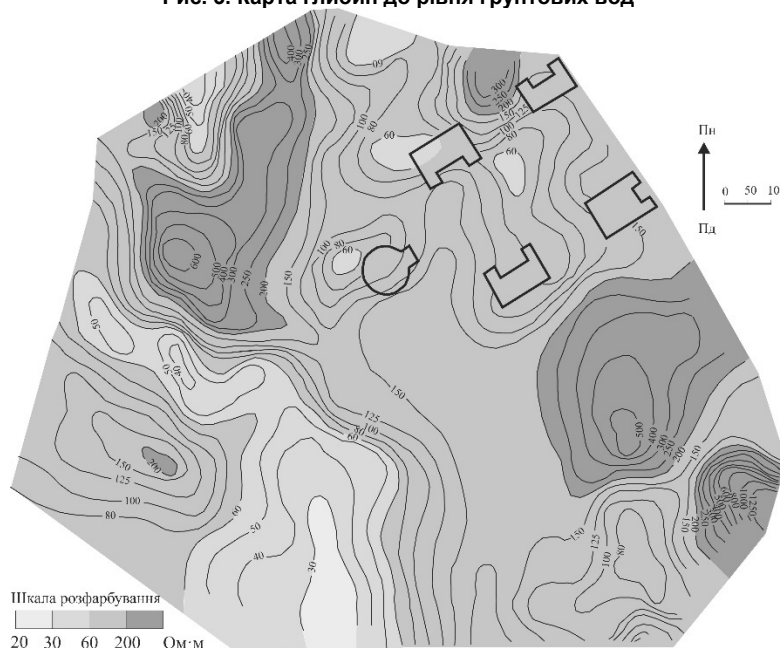
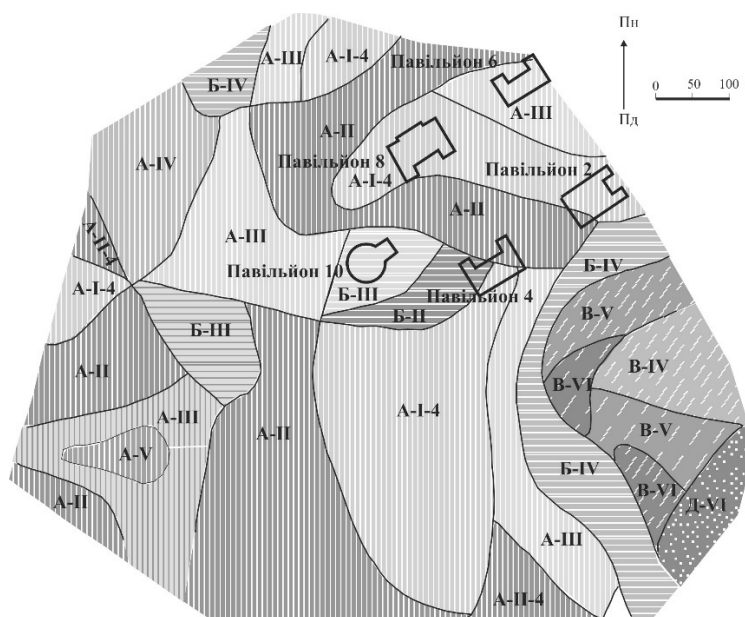
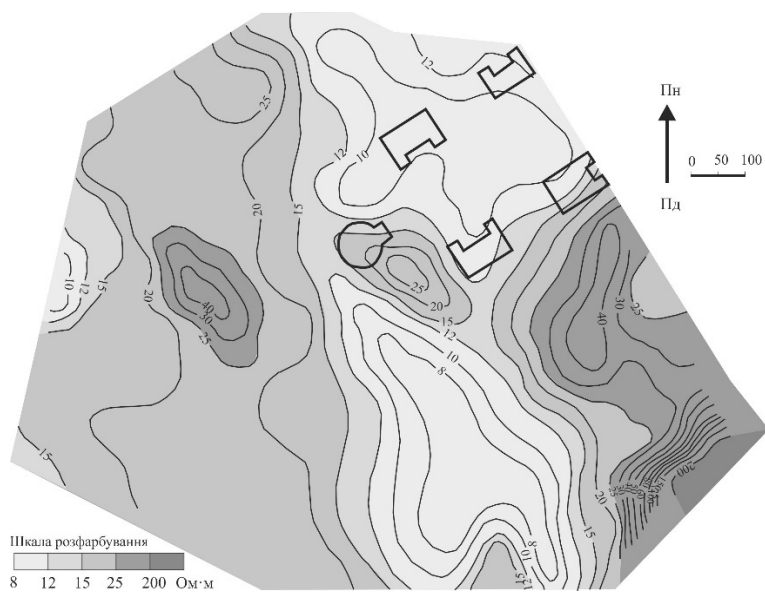
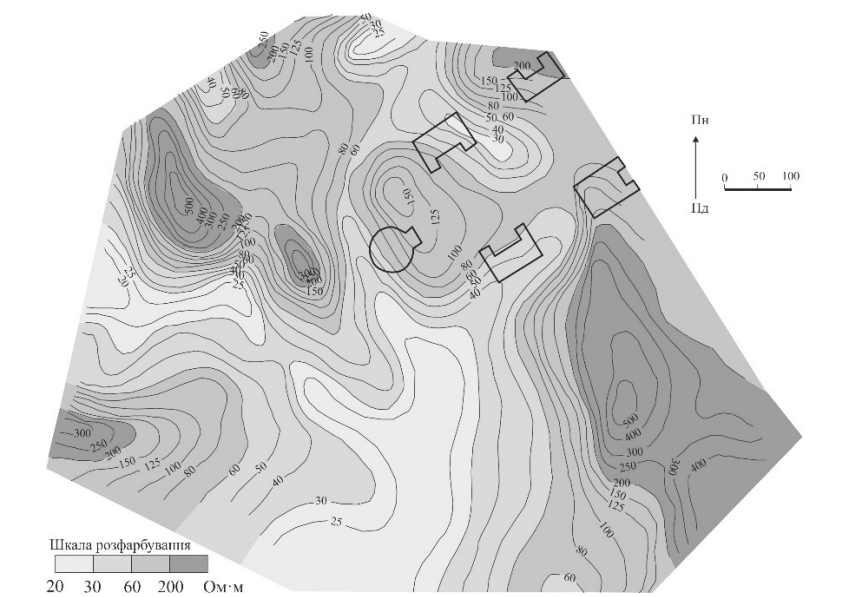


Рис. 4. Карта питомого електричного опору ґрунтів в інтервалі глибин 0–1,2 м



На карті питомих електричних опорів порід, розповсюджених в інтервалі глибин 3,5–10 м (рис. 6), максимумами ρ мають локальний характер. Переважають уже області понижених і низьких значень опорів – відповідно 25–60 і 8–25 Ом·м. Це переважно повністю водонасичені, слабо- і дуже слабопроникні утворення. На

картах опорів при глибинах більше 10 м майже повністю зникли максимуми, переважають значення опорів менше 20 Ом·м. Тут розповсюджені переважно дуже слабопроникні й майже непроникні утворення: глини і моренні суглинки важкі (водотрив).

Таблиця 1

Геолого-геофізичні моделі верхньої частини розрізу. Ділянка "Експоцентр України"

№	Модель ВЧР	Геоелектричний горизонт I, інтервал глибин 0–1,2 м	Геоелектричний горизонт II, інтервал глибин 1,2–3,5 м	Геоелектричний горизонт III, інтервал глибин 3,5–10 м	Ступінь підтоплення
1	A-I-4	Дерново-підзолисті та насипні ґрунти, нормально зволожені, проникні, ρ 60–150 Ом·м	Суглинки легкі, оглеєні дуже слабо і слабопроникні, $\rho < 20$ Ом·м	Суглинки важкі, глина. Дуже слабопроникні, $\rho < 15$ Ом·м	Фундаменти споруд у підтопленому стані
2	A-II-4	Дерново-підзолисті та насипні ґрунти, нормально зволожені, проникні, ρ 60–150 Ом·м	Суглинки легкі, слабооглеєні, слабопроникні, ρ 20–30 Ом·м	Суглинки важкі, глина. Дуже слабопроникні, $\rho < 15$ Ом·м	Фундаменти споруд у підтопленому стані
3	A-II	ґрунти сірі лісові, чорноземні, лугово-чорноземні, місцями оглеєні і перезволожені, слабопроникні, ρ 20–30 Ом·м	Суглинки легкі, слабооглеєні, слабопроникні, ρ 20–30 Ом·м	Суглинки важкі, глина. Дуже слабопроникні, $\rho < 15$ Ом·м	Фундаменти споруд у підтопленому стані
4	B-II	ґрунти сірі лісові, чорноземні, лугово-чорноземні, місцями оглеєні і перезволожені, слабопроникні, ρ 20–30 Ом·м	Суглинки легкі, слабооглеєні, слабопроникні, ρ 20–30 Ом·м	Суглинки середні, слабопроникні, ρ 15–25 Ом·м	Фундаменти споруд у підтопленому стані
5	A-III	Дерново-підзолисті ґрунти. Проникні і менш проникні, часто перезволожені, ρ 30–60 Ом·м	Суглинки легкі. Проникні і менш проникні, ρ 30–60 Ом·м	Суглинки важкі, глина. Дуже слабопроникні, $\rho < 15$ Ом·м	Фундаменти споруд у підтопленому стані
6	B-III	Дерново-підзолисті ґрунти. Проникні і менш проникні, часто перезволожені, ρ 30–60 Ом·м	Суглинки легкі. Проникні і менш проникні, ρ 30–60 Ом·м	Суглинки середні, слабопроникні, ρ 15–25 Ом·м	Фундаменти споруд у підтопленому стані
7	A-IV	Дерново-підзолисті та насипні ґрунти нормально і менш зволожені, проникні, ρ 60–150 Ом·м	Суглинки легкі, пілуваті, супіски проникні, ρ 60–120 Ом·м	Суглинки важкі, глина. Дуже слабопроникні. $\rho < 15$ Ом·м	Фундаменти споруд потенційно підтоплювані
8	B-IV	Дерново-підзолисті та насипні ґрунти нормально і менш зволожені, проникні, ρ 60–150 Ом·м	Суглинки легкі, пілуваті, супіски проникні, ρ 60–120 Ом·м	Суглинки середні, слабопроникні, ρ 15–25 Ом·м	Фундаменти споруд потенційно підтоплювані
9	B-IV	Дерново-підзолисті та насипні ґрунти нормально і менш нормально зволожені, проникні, ρ 60–150 Ом·м	Суглинки легкі, пілуваті, супіски, проникні, ρ 60–120 Ом·м	Суглинки легкі, супіски. Проникні й менш проникні, ρ 25–60 Ом·м	Ділянки не сприятливі до підтоплення
10	A-V	Дерново-підзолисті ґрунти, піски, малозволожені, проникні, ρ 150–200 Ом·м	Супіски і піски, малозволожені проникні, ρ 120–200 Ом·м	Суглинки важкі, глина. Дуже слабопроникні, $\rho < 15$ Ом·м	Фундаменти споруд потенційно підтоплювані
11	B-V	Дерново-підзолисті ґрунти, піски, малозволожені, проникні, ρ 150–200 Ом·м	Супіски і піски, малозволожені проникні, ρ 120–200 Ом·м	Суглинки середні, слабопроникні, ρ 15–25 Ом·м	Фундаменти споруд потенційно підтоплювані
12	B-V	Дерново-підзолисті ґрунти, піски, малозволожені, проникні, ρ 150–200 Ом·м	Супіски і піски, малозволожені проникні, ρ 120–200 Ом·м	Суглинки легкі, супіски. Проникні й менш проникні, ρ 25–60 Ом·м	Ділянки несприятливі до підтоплення
13	B-VI	Піщані ґрунти, піски, насипні ґрунти добре проникні, $\rho > 200$ Ом·м	Піски сухі, добре проникні, $\rho > 200$ Ом·м	Суглинки середні, слабопроникні, ρ 15–25 Ом·м	фундаменти споруд потенційно підтоплювані
14	B-VI	Піщані ґрунти, піски, насипні ґрунти добре проникні, $\rho > 200$ Ом·м	Піски сухі, добре проникні, $\rho > 200$ Ом·м	Суглинки легкі, супіски. Проникні і менш проникні, ρ 25–60 Ом·м	Ділянки несприятливі до підтоплення
15	D-VI	Піщані ґрунти, піски, насипні ґрунти добре проникні, $\rho > 200$ Ом·м	Піски сухі, добре проникні, $\rho > 200$ Ом·м	Піски різнозернисті. Добре проникні, $\rho > 120$ Ом·м	Ділянки несприятливі до підтоплення

У результаті комплексного аналізу геофізичних даних створено ГТМ верхньої частини території підтоплення Експоцентру України. На рис. 7 наводиться карта геолого-геофізичних моделей, а в табл. 1 – їхня характе-

ристика. На території досліджень за геофізичними даними виділено чотири мікрообстановки. Мікрообстановка 1 – ділянки з насипними ґрунтами, фундаменти споруд у підтопленому стані (моделі A-I-4, A-II-4).

Мікрообстановка 2 – ділянки з гідроморфними та напівгідроморфними ґрунтами, фундаменти споруд і ґрунти в підтопленому стані (моделі А-II, Б-II).

Мікрообстановка 3 – ділянки з автоморфними ґрунтами, фундаменти споруд потенційно підтоплювані (моделі А-III, Б-III, А-IV, Б-IV, А-V, Б-V).

Мікрообстановка 4 – ділянки з піщаними та насипними ґрунтами, несприятливі до підтоплення (моделі В-IV, В-V, В-VI, Д-VI).

На ділянках, які зазнали підтоплення, формується глейове середовище. Тобто відбуваються глибокі зміни складу, водно-фізичних, геоелектричних властивостей ґрунтів і приповерхневих осадових відкладів. Активізуються процеси заболочення, засолення, замулення, оглеєння. Змінені ґрунти і породи, порівняно з незміненими, характеризуються більш низькою водопроникністю і більш високою електричною провідністю. Таким чином, геоелектричне картування змінених утворень дозволяє виділити різною мірою підтоплені ділянки. На відміну від методів прямого вивчення підтоплення, заснованих на режимних спостереженнях зміни РГВ, у даному випадку використовуються геофізичні критерії. Використання комплексу погоризонтних геоелектричних карт і розрізів дозволяє з достатньою деталісттю і достовірністю вивчати підтоплення земель і зміни їхніх властивостей.

Висновки. Підсумовуючи сказане, слід зазначити, що:

1. Виділено три етапи спеціалізованих досліджень підтоплення територій: рекогносцирувально-методичний, детальний та моніторинговий. На кожному із цих етапів застосовується спеціалізований комплекс геофізичних методів. Для вирішення завдань, пов'язаних з вивченням процесів підтоплення на детальному етапі, раціональний комплекс мікрогеофізичних методів включає: мікроелектрозондування, мікроелектрозондування способом викликанної поляризації, резистивиметрію поверхневих і ґрунтових вод, георадарний метод і мікросейсмосондування методом заломлених хвиль. Залежно від природних умов ділянки досліджень і економічної доцільності обсяги застосування конкретних методів можуть змінюватись. Основою геофізичного комплексу є мікроелектрозондування. Слід зазначити, що найбільш універсальними та ефективними за значним обсягом вирішуваних специфічних завдань при вивченні ділянок підтоплення є електрометричні методи.

2. Доцільність використання геофізичних методів для вивчення підтоплення територій не викликає сумніву. Однак слід урахувати те, що раціональний комплекс геофізичних методів при дослідженні процесів підтоплення визначається для кожної окремої природної обстановки (окремої ділянки) з урахуванням: можливості виконання польових досліджень окремим геофізичним методом на даній ділянці; наявності диференціації порід за фізичними властивостями, що використовуються конкретним геофізичним методом; економічної ефективності застосування даного геофізичного методу. Надалі, у міру накопичення досвіду досліджень, постають більш складні завдання – геофізичного вивчення динаміки процесів підтоплення, що є завданням моніторингового етапу досліджень.

3. На ділянці підтоплення Експоцентр України, зважаючи на забудову місцевості та економічну доцільність, для вивчення підтоплення застосовувався геофізичний комплекс, що включав мікроелектрозондування та мікросейсмосондування кореляційним методом заломлених хвиль з бурінням неглибоких параметричних свердловин на окремих профілях. Геоелектричні дослідження показали високу ефективність. За результатами цих досліджень складено погоризонтні карти електричних опорів і геолого-геофізичні моделі верхньої частини розрізу, на

основі яких виконано класифікацію території Експоцентру України за ступенем підтоплення.

4. Застосування раціонального комплексу геофізичних досліджень та організація геофізичного каналу моніторингу ділянок підтоплення є необхідним і економічно виправданим засобом для ефективного планування та виконання захисних інженерно-меліоративних заходів з метою зниження і уникнення негативного впливу процесів підтоплення на довкілля та об'єкти господарської інфраструктури.

Робота виконана в межах наукової теми 18БП049-01 Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Список використаних джерел

- Вишва, С.А. (2004). Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. Київ: "Обрії", 236 с.
- Вишва, С.А., Онишчук, В.І., Онишчук, І.І., Рева, М.В. (2018). Інженерна геофізика. Підручник. ВПЦ "Київський університет", 592 с. ISBN 978-966-439-997-1.
- Вишва, С.А., Рева, М.В., Онишчук, В.І., Онишчук, І.І. (2007). Геоелектричні параметри ґрунтів та порід у верхній частині розрізу лісостепової зони України. *Геофізичний журнал*, 3(29), 116–121.
- Гурицький Д. С. (2013). Аналіз регіонального розвитку процесів підтоплення земель та їх вплив на природні ресурси України. *Геоінформатика*, 1, 85–89. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf_2013_1_12.
- Методические рекомендации по изучению подтопления в комплексе работ по крупномасштабной съемке для целей мелиорации. (1984). Днепропетровск: Ротапринт ДО ИМР, 34 с.
- Онишчук, І.І. (2005). Розробка технології мікрогеофізичних досліджень процесів підтоплення ґрунтів (на прикладі Лісостепу Придніпров'я та Київського Полісся). *Автореф. дис. ... канд. геол. наук*. Київ, 22 с.
- Онишчук, І.І., Рева, М.В. (2004). Принципи геофізичного картування стану земель. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 29–30, 36–40.
- Ромашченко, М.І., Савчук, Д.П. (2001). Підтоплення земель в Україні. *Вісник аграрної науки*, 8, 54–59.
- Семенчук, І.М., Бірюкова, О.О., Бреславець, В.В. (2018). Економічні збитки від підтоплення територій України. *Агросвіт*, 2, 40–44. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrosvit_2018_2_8.
- Шестаков, В.М. (1979). Динамика подземных вод. М.: МГУ, 363 с.
- Tyutyunnik, Yu.G., Onyshchuk, I.I., Shabatura, A.V. (2004). Electrical Resistivity of genetic soil horizons. *Eurasian Soil Sciences*, 37, 2, 177–180.
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Application of geophysical methods in the study of landslides. *18th International Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, 2019 May 13–16, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902066>.
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). The mapping of submerged (flooding) lands by geophysical methods. *XIII International Scientific Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2019 November 12–15, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903225>.
- #### References
- Guidelines for the study of flooding in the complex of work on large-scale surveys for land reclamation. (1984). Dnepropetrovsk: Offsetprint IMR. [in Russian]
- Guritskiy, D.S. Analysis of regional development of flooded lands and their impact on the natural resources of Ukraine. *Geoinformatics*, 1, 85–89. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf_2013_1_12.
- Onyshchuk, I. (2005). Development of technique of microgeophysical measurements of flooding process of soils (on example of forest-steppe of the Dnieper region and Kyiv Polissia). *Extended abstract of Candidate's thesis (Geol.Sci.)*. Kyiv: "Obrii". [in Ukrainian]
- Onyshchuk, I.I., Reva M.V. (2004). Principles of a geophysical map of the land. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 29–30, 6–40. [in Ukrainian]
- Romashchenko, M.I., Savchuk, D.P. (2001). Flooding of soils in Ukraine. *Visnyk of agricultural science*, 8, 54–59. [in Ukrainian]
- Semenchuk, M.I., Biriukova, O.O., Breslavets, V.V. (2018). Economic losses from flooding of the territories of Ukraine. *Agrosvit*, 2, 40–44. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrosvit_2018_2_8.
- Shestakov, V. (1979). The dynamics of groundwater. M.: Moscow State University. [in Russian]
- Tyutyunnik, Yu., Onyshchuk, I., Shabatura, O. (2004). Electrical Resistivity of genetic soil horizons. *Eurasian Soil Sciences*, 37, 2, 177–180.
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M. (2007). Geoelectric parameters of soils and rocks at the top of the section of the forest-steppe zone of Ukraine. *Geophysical Journal*, 3 (29), 116–121. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Application of geophysical methods in the study of landslides. *18th International Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, 2019 May 13–16, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902066>.

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

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

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

Надійшла до редколегії 25.08.2020

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

GEOPHYSICAL STUDY OF FLOODING OF URBAN CONGLOMERATES AREAS

The article is dedicated to using of the geophysical study of flooding of urban conglomerates areas. The studies were performed within the framework of three stages of exploration of flooding area: reconnaissance-methodical, detailed and monitored ones. The most effective principles of the geophysical mapping of flooding area with geoelectrical horizontal section in depth, creation of geological and geophysical model of the upper part of the section are described. This approach made an assessment tool for classification of the flooding-prone urban areas (on example of flooding area of the Expocenter of Ukraine territory, Kyiv).

It is important to note that there is no universal set of geophysical methods for the study of flooding of urban area. This point must be taken into account when choosing the proper geophysical method, elimination of the effects of physical differentiation of soils and economic efficiency of the chosen complex of geophysical methods.

Keywords: flooding, microelectric sounding, upper section of the section, geological and geophysical models, engineering and geophysical studies, electrical resistivity.

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

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ

Посвящено особенностям применения геофизических методов исследований при изучении подтопления территорий городских агломераций. Освещены задачи, которые ставятся при специализированных исследованиях подтопления, комплексы и особенности геофизических методов для их решения. Выделены три этапа специализированных исследований подтопления территорий: рекогносцировочно-методический, детальный и мониторинговый. Определены принципы геофизического картирования состояния земель путем их геоэлектрического погоризонтного изучения и разработаны геолого-геофизические модели верхней части разреза, что является основой оценки территории с точки зрения склонности к подтоплению.

Для примера приведены результаты геофизических исследований, выполненных в пределах участка подтопления на территории Экспоцентра Украины, и построены соответствующие геолого-геофизические модели верхней части разреза.

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

Ключевые слова: подтопление, микроэлектронзондирование, верхняя часть разреза, геолого-геофизические модели, инженерно-геофизические исследования, удельное электрическое сопротивление.

УДК 550.552.53.553

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.02>

О. Карпенко, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: karpenko.geol@gmail.com,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
В. Соболев,
E-mail: vasyl.sobol@dkz.gov.ua,
Державна комісія України по запасах корисних копалин;
М. Миронцов, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: myrontsov@ukr.net,
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України;
І. Карпенко, канд. геол. наук,
E-mail: sharanskiy@gmail.com,
Національна акціонерна Компанія "Нафтогаз України"

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ГЕОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ГЛИБИНУ ЗОНИ ПРОНИКНЕННЯ ФІЛЬТРАТУ ПРИ ПЕРВИННОМУ РОЗКРИТТІ ГРАНУЛЯРНИХ КОЛЕКТОРІВ ЗА ДАНИМИ ГДС

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

Розглянуто можливості використання даних геофізичних досліджень свердловин для виявлення факторів геологічної природи, які впливають на формування зони проникнення фільтрату промивної рідини при бурінні нафтогазових свердловин. Використано дані електричного каротажу зондами різного розміру та різних типів для адекватного розрахунку відносного діаметра зони проникнення. Для аналізу відібрано п'ять свердловин з газоконденсатного родовища. Теригенний розріз свердловин представлений чергуванням аргілітів, алевролітів і пісковиків. Порода-колектори – гранулярного типу; обрано для аналізу пласти з товщинами від 3,4 до 18,2 м. За результатами статистичного аналізу (кластерний і факторний аналізи) виявлено три групи порід, характерними ознаками яких є суттєві відмінності у величинах зони проникнення, товщини пластів, а також коефіцієнтів пористості й газонасичення. Установлено, що для теригенних розрізів з породами-колекторами гранулярного типу (серпуховський ярус) для одного родовища на прикладі п'яти свердловин існує максимальна пряма кореляція між величиною відносного діаметра зони проникнення і товщиною пласта. Проведені дослідження дозволяють робити прогностичні оцінки щодо наближених розподілів діаметрів зони проникнення в теригенних розрізах у разі безаварійного буріння з дотриманням технологічних умов проводки свердловин.

Ключові слова: порода-колектор, геофізичні дослідження свердловин, зона проникнення, кластерний аналіз, відносний діаметр, питомий електричний опір, коефіцієнт пористості.

Постановка проблеми. Якість первинного розкриття пласта є одним із ключових моментів успішного освоєння свердловини і, як результат – отримання максимально можливих дебітів нафти або газу, виявлення нових покладів вуглеводнів у пошукових або розвідувальних свердловинах. Наявність великих зон проникнення фільтрату промивної рідини суттєво впливає на ефективність пошуково-розвідувальних робіт, може бути причиною пропусків продуктивних пластів як на етапі геологічної інтерпретації каротажних матеріалів, так і за результатами випробувань виявлених об'єктів. Численні теоретичні та лабораторні дослідження свідчать, що промивна рідина на водяній основі, яка використовується під час розкриття пласта, у більшості випадків знижує природну проникність пористого середовища. Лабораторні дослідження кернів указують, що коефіцієнт проникності гірської породи зазвичай зменшується на 15–60 % (Гиматулов, 1974). Слід зазначити, що ці дані стосуються абсолютної проникності. При заповненні порового простору зони проникнення в присвердловинній зоні фільтратом промивної рідини (у подальшому – просто фільтратом) значення фазової проникності для нафти або газу можуть зменшуватись ще більше. Одним із найбільш суттєвих процесів взаємодії промивної рідини з гірськими породами під час їхнього розкриття є фільтрація, яка визначає явище поглинання промивної рідини і нафтогазоводопроявлення, глинизацію стінок свердловини (утворення глинистої кірки), кольматацию присвердловинної зони порід-колекторів, суфозию у фільтраційній зоні свердловини під час виклику припливу і подальшої експлуатації, розущільнення і набухання глинистих мінералів і багато інших процесів, які суттєво впливають на якість закінчення свердловини. На величину зони проникнення впливають чинники як природного, так і технологічного характеру. Щодо технологічних особливостей впливу на діаметр і характеристики зони

проникнення, то однозначно віддають перевагу фізико-хімічним властивостям промивної рідини, величині репресії на пласт і тривалості процесу розкриття пласта-колектора. Репресія на пласт може створюватись як під дією стовбура промивної рідини, так і завдяки імпульсним надлишковим тискам під час спуску бурового інструмента, зміні режиму роботи бурових насосів. Природні фактори також призводять до формування різних за величиною зон проникнення в пластах-колекторах. Установлення розмірів зони проникнення, вивчення її особливостей є вкрай важливим завданням, яке пов'язано з обранням правильної технології освоєння свердловини, інтенсифікації видобутку та зменшення ризиків пропусків продуктивних об'єктів. Причому однозначну перевагу тут віддають методам промислової геофізики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням зони проникнення фільтрату в колектор, визначенням ступеня засмічування присвердловинної зони пластів присвячено велику кількість публікацій, наукових робіт і розробок, що є свідченням актуальності та важливості цієї теми (Ягафаров та ін., 2010; Бойко, 2010). За даними геофізичних досліджень свердловин (ГДС) найбільш точно діаметр зони проникнення ($D_{\text{зп}}$) визначається методами електрометрії з використанням зондів різного розміру. Теоретичне обґрунтування методики оцінки $D_{\text{зп}}$ за даними різноглибинних зондів БКЗ було виконано в 50-х рр. минулого століття Г. Доллем, Л. Альпіним, В. Дахновим, С. Комаровим та ін. Удосконалення визначення електричних параметрів пластів і зони проникнення за даними електрометрії свердловин інтенсивно відбувалося у 80-х рр. минулого століття, коли почали розвиватись ізорезистивні методики комплексної інтерпретації даних зондів електрокаротажу різних типів. Слід зазначити, що значний прогрес щодо достовірності та детальності оцінки радіальних змін фізичних параметрів пластів у присвердловинній зоні розпочався, коли в

практику геофізичних досліджень свердловин активно почали впроваджувати багатозондові прилади бокового та індукційного каротажу (для прикладу – апаратура ВІКІЗ) (Федин, 2001; Myrontsov, 2012, 2019¹, 2019²). Щодо вивчення впливу ємнісно-фільтраційних параметрів пластів-колекторів на розміри та зміни фізичних характеристик зони проникнення фільтрату, то тут також слід відмітити постійний інтерес дослідників до цієї теми. Проте різноманіття літофаціальних особливостей порід, специфіка розподілу пелітової компоненти в продуктивних товщах, структура пустотного простору, мінеральний склад вносять значні корективи щодо оцінки розмірів і неоднорідності зони проникнення як по вертикалі, так і по латералі продуктивних об'єктів (Ірбз, 2011; Ахияров, 1975; Таужнянский, 2005).

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Формулювання цілей статті. Особливості геологічної будови нафтових і газових родовищ різних регіонів України вимагають від дослідників використовувати різноманітні підходи при оцінці розмірів зони проникнення і можливих негативних наслідків взаємодії фільтрату промивної рідини та інших агентів з гірськими породами в присвердловинних частинах продуктивних пластів. Це неодноразово відмічалось на виробничих нарадах, науково-практичних конференціях різного рівня. За даними ГДС виконують розрахунки для визначення обсягу флюїду, який потрібно вилучити з пласта і лише після цього можна отримувати об'єми вуглеводнів або рухомої порової води, що поза зоною проникнення (Ірбз, 2011). Аналіз комплексного впливу літологічних, ємнісних і фільтраційних параметрів на формування зони проникнення на родовищах ДДЗ до останнього часу на рівні кількісних розрахунків з використанням результатів геофізичних досліджень не проводився. Дана робота є певною мірою узагальненням результатів досліджень у цьому напрямі для типових розрізів газових родовищ південної прибортової зони ДДЗ.

Геологічні особливості об'єкта дослідження. Вище було наведено перелік основних чинників, які беруть участь у формуванні зони проникнення фільтрату в пласті. Для аналізу, які чинники є головними в конкретному геологічному розрізі родовища або покладі (або в окремому горизонті), слід обрати низку об'єктів, які мали б спільні риси літофаціальних умов формування. У даній статті наведено результати досліджень, одержаних при вивченні розрізів свердловин газоконденсатного родовища. Породи серпуховського ярусу представлені чергуванням аргілітів, алевролітів, пісковиків. Зустрічаються невеликі прошарки кам'яного вугілля. Породи-колектори – пісковики і алевроліти, переважно кварцового складу, але зустрічаються і поліміктові різновиди. Товщини пластів-колекторів змінюються по розрізах свердловин від 0,6 до 18,2 м. Коефіцієнт пористості – від 0,07 до 0,242. Поровий простір – гранулярного типу; практично відсутня тріщинна складова. Такі фаціальні умови є оптимальними для вивчення геологічних закономірностей формування зони проникнення в присвердловинному просторі.

Методичні прийоми та результати досліджень. Зазвичай за даними типового комплексу геофізичних досліджень свердловин, до складу якого входить, як мінімум, метод БКЗ, під час геофізичної інтерпретації визначають, зокрема, параметри зони проникнення – діаметр (відношення $D_{зп}$ до d_c – діаметра свердловини) і питомий електричний опір $\rho_{зп}$. Для цього мають виконуватися дві умови: наявність самої зони проникнення та суттєва відмінність значень питомого електричного опору пласта ρ_n і $\rho_{зп}$. Сьогодні широко вживаними способами інтерпретації даних електрометрії є спосіб мінімізації й спосіб "приведених кривих". Власно вони є основними для комплексної інтерпретації даних БКЗ, ІК (у т.ч. ВІКІЗ), БК, МКЗ, потенціал-зонда і МКЗ; що реалізовані в автоматизованому програмному

комплексі Геопоиск (Система обробки та інтерпретації промислової геофізичної й суміжній геологічної, петрофізичної та сейсмічної інформації) (Красножон та ін., 2007). Результати такої інтерпретації ($D_{зп}/d_c$ і $\rho_{зп}/\rho_n$) наведено на планшетах на рис. 1.

З метою мінімізації впливу мінливості факторів технологічного характеру було підібрано п'ять свердловин з одного родовища за умови відсутності під час буріння в них аварійних ситуацій. Крім того, після проведення інтерпретації в попластовому режимі була виконана фільтрація отриманих даних. Були вилучені з подальшого аналізу дані по пластах товщиною менше 3,4 м. Це було зроблено для запобігання неточності зняття відліків з кривих зондів великих розмірів при частому чергуванні пластів та електричній неоднорідності розрізу. Також для створення максимально однорідної вибірки, з точки зору колекторських властивостей пластів, і наявності тришарових фактичних кривих зондування (ФКЗ) були вилучені з вибірки для аналізу пласти з коефіцієнтом пористості менше за 0,07 і середніми значеннями глинистості більше 0,2. На рис. 2 наведено типовий приклад інтерпретації даних електрометрії за способом мінімізації з типовою тришаровою кривою ФКЗ для пласта товщиною 18,2 м.

Таким чином, із розрізів п'яти свердловин було залишено 40 (із 59) пластів різних товщин і мінливості як ємнісних характеристик (коефіцієнти пористості K_n , глинистості $K_{гп}$ і газонасичення K_f), так і електричних ($\rho_{зп}$ і ρ_n). Графіки фактичних розподілів імовірностей значень окремих величин вибірки наведено на рис. 3.

Наведений на рис. 3 розподіл товщин пластів-колекторів відповідає виконаному розчленуванню розрізів газоконденсатних свердловин за комплексом каротажних кривих з урахуванням аномалій як геофізичних "методів пористості і глинистості", так і методів опору. Слід зазначити, що розріз доволі чітко диференційований на кривих комплексу і питань щодо літологічної належності пластів не виникало. Виділяється група потужних пластів пісковиків і алевролітів з товщинами більше 12 м (рис. 3). Усі вони мають добрі колекторські властивості й належать до категорії продуктивних. Як буде показано нижче, діаметри зони проникнення напроти них досягають найбільших значень. Відносний діаметр зони проникнення розподіляється за своїми значеннями на три групи: мінімальні, де радіус проникнення фільтрату в радіальному напрямку не перевищує 0,3–0,5 м (див рис. 3), середні та максимальні (третя група). У третій групі відповідно до наведених розподілів на рис. 3 абсолютні значення радіусів зони проникнення перебувають у межах 1,2–2 м. Це відповідає значенням 14–20 відносних діаметрів зони проникнення $D_{зп}/d_c$.

Слід зазначити, що практично єдиним способом оцінки величини зони проникнення фільтрату в пласт є кількісна інтерпретація даних електрокаротажу. Існують методики розрахунків кількості фільтрату, що може проникнути в пласт під час розкриття пласта на глинистому розчині з подальшими оцінками розмірів $D_{зп}$ (Гиматудинов, 1974; Федин, 2001). Проте відсутність інформації про реальний вплив колекторських і літологічних властивостей гірських порід на процеси фільтрації суттєво знижують достовірність таких розрахунків. Безумовно, точність визначення діаметра зони проникнення в результаті геофізичної інтерпретації також суттєво залежить від геоелектричних характеристик гірських порід, особливостей інтерференції сигналів від сусідніх пластів і від диференційних характеристик зондів електрокаротажу різних типів. Суттєвий вплив на результати інтерпретації, який складно оцінити та передбачити, відбувається внаслідок анізотропії та вертикальної мінливості питомого електричного опору. Тому для проведення статистичного аналізу всі результати інтерпретації даних ГДС були ретельно перевірені й відібрані лише найбільш достовірні значення.

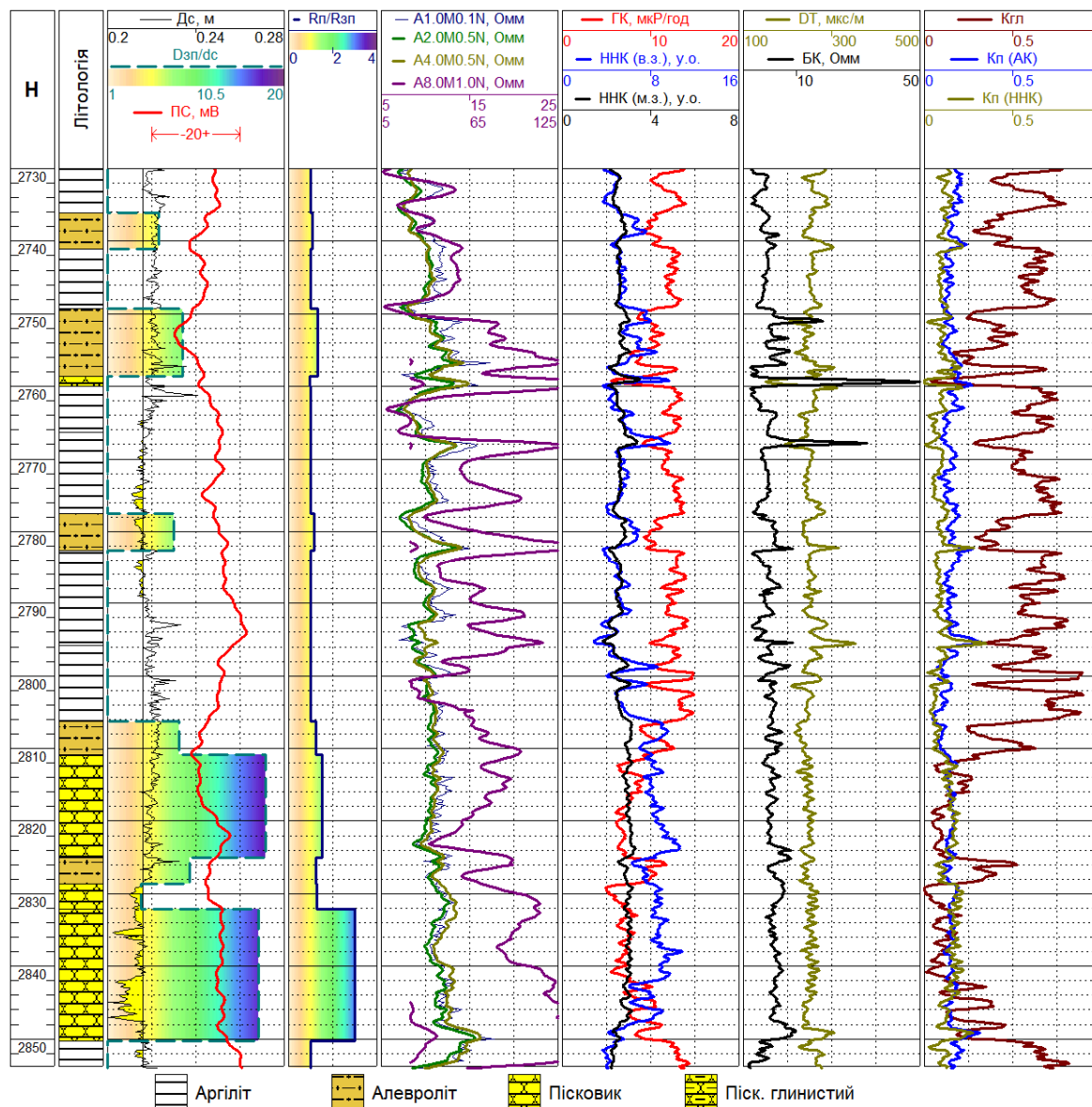


Рис. 1. Результати інтерпретації даних комплексу ГДС у теригеному розрізі свердловини (серпуховський ярус) з метою оцінки електричних характеристик пластів і параметрів зони проникнення фільтрату промивної рідини

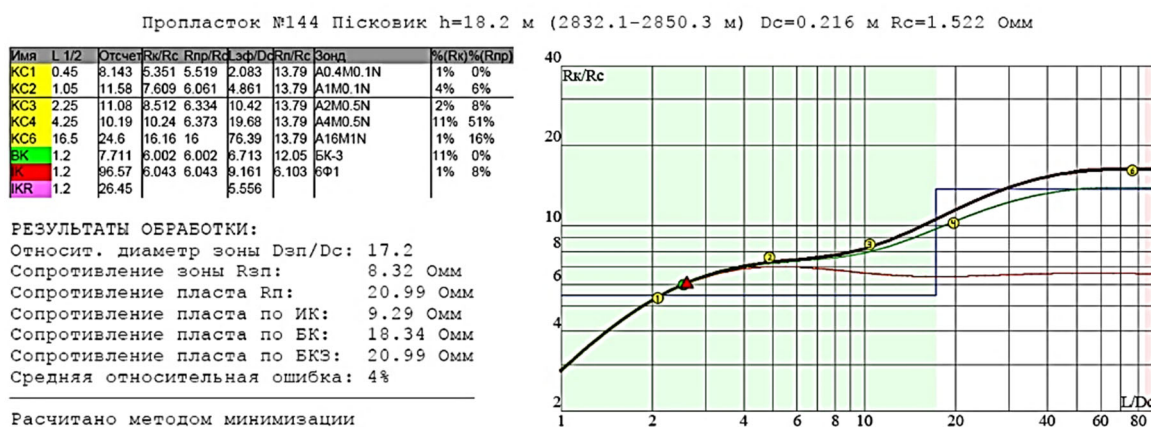


Рис. 2. Приклад інтерпретації тришарової кривої ФКЗ за способом мінімізації в середовищі Геописк з визначенням геоелектричних характеристик пласта і зони проникнення

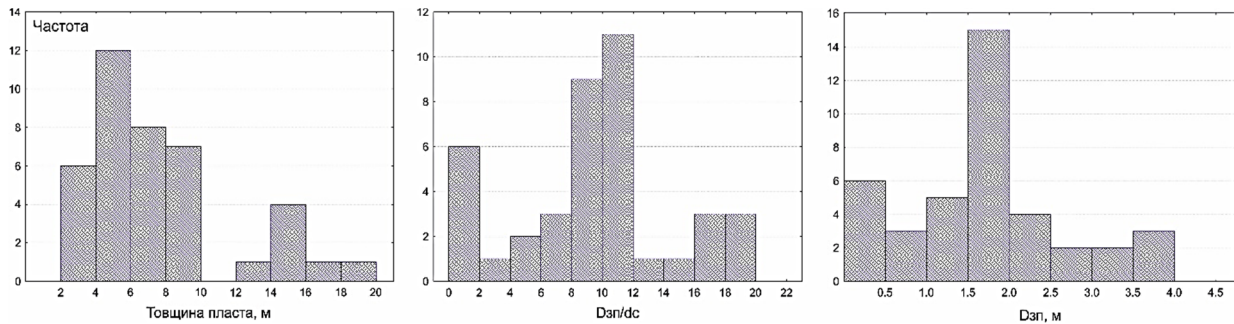


Рис. 3. Розподіли імовірностей товщин пластів-колекторів і розрахованих значень відносного діаметра D_{3n}/D_n та абсолютних значень діаметра D_{3n} зони проникнення по п'єзети свердловинах для теригенної частини розрізу серпуховського ярусу

На даному етапі досліджень було недоцільним шукати кількісні регресійні зв'язки між окремими характеристиками порід і діаметром зони проникнення. Занадто великий вплив існує тут від мінливості технологічних умов розкриття пластів, які суттєво ослаблюють можливі кореляційні зв'язки. Для виявлення основних факторів, які визначають глибину проникнення фільтрату промивної рідини, спочатку був задіяний факторний аналіз із застосуванням методу головних компонент. Його завданням було

виявлення основних чинників впливу та відсіяння другорядних. Після численних спроб оптимізувати набір літолого-петрофізичних параметрів у вибірці для аналізу були виділені такі (див. табл. 1): D_{3n}/dc , h (товщина пласта), K_n , $K_{гн}$, K_r . Параметр відносної глинистості $K_{гн}/(K_n + K_{гн})$ дублює інші ємнісні характеристики та, як з'ясувалося, є доволі складним при якісному тлумаченні отриманих результатів.

Таблиця 1

Матриця значень факторних навантажень при застосуванні методу головних компонент для аналізу вибірових даних з досліджуваних свердловин

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
h	0,77*	0,44	0,18	0,29	0,31
D_{3n}/dc	0,74	0,52	-0,24	-0,04	-0,34
$K_{гн}$	-0,30	0,61	0,63	-0,37	-0,01
K_n	0,42	-0,57	0,65	0,20	-0,18
K_r	0,70	-0,43	-0,06	-0,55	0,13
Навантаження	0,38	0,27	0,18	0,11	0,05

*Жирним шрифтом виділено суттєві значення факторних навантажень (коефіцієнтів)

Доволі чітко простежується в першому найбільш значущому факторі прямий взаємозв'язок між товщиною, відносним діаметром зони проникнення та коефіцієнтом газонасичення порід. Також помітний прямий вплив величини пористості колекторів на збільшення діаметра D_{3n}/dc . Між коефіцієнтами пористості та глинистості тут існує від'ємна залежність (див. Фактори 1, 2), що є доволі частим явищем для гранулярних теригенних колекторів. У першому факторі (або компоненті), як було сказано, виявляється прямий взаємозв'язок між перерахованими значущими параметрами і коефіцієнтом газонасичення K_r . Коефіцієнт максимального газонасичення в гранулярних колекторах значною мірою залежить від величини залишкової (зв'язаної) води, яка в свою чергу є функцією адсорбційних властивостей породи, що контролюється (в основному) розміром пор, глинистістю та ступенем гідрофобності. Збільшення пористості, зменшення глинистості, як правило, призводить до зменшення коефіцієнта залишкового водонасичення та відповідно – до збільшення нафтогазонасичення породи. Що ми й бачимо в результаті аналізу факторних навантажень у табл. 1 (Фактор 1). Поліпшення колекторських умов у потужних пластах з найбільшою товщиною приводить до

збільшення глибини проникнення фільтрату в них. Для підкріплення таких висновків був застосований інший метод математичної статистики – кластерний аналіз, який допомагає за формальними ознаками виділити декілька груп (кластерів), в яких спостережні об'єкти (пласти) оптимально згруповані за певними правилами.

У табл. 2 наведено результати кластерного аналізу багатовимірної вибірки, яка була розглянута при проведенні факторного аналізу.

Кластерний аналіз дозволив установити дуже важливі закономірності, характерні для даного типу колекторів. Висновки, які були зроблені під час інтерпретації даних методу головних компонент, підтверджуються даними, наведеними в табл. 2. Дуже високі розміри зони проникнення, у середньому 17,8 D_{3n}/dc , характерні для потужних пластів пісковиків з найбільш високими значеннями пористості (у середньому 0,15) і коефіцієнта газонасичення – 0,69 у середньому. Тобто підтверджується попередньо зроблений висновок, що найбільш глибоке проникнення фільтрату відповідає газонасиченим пластам з найкращими колекторськими властивостями і значної товщини.

Таблиця 2

Результати проведення кластерного аналізу з метою виділення окремих груп порід за комплексом ознак – середні значення параметрів по кластерах

	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
h	6,7	5,2	15,6
D_{3n}/dc	10,6	3,7	17,8
$K_{гн}$	0,10	0,12	0,11
K_n	0,12	0,14	0,15
K_r	0,60	0,57	0,69
Об'єм вибірки	22	12	6

Найгірші умови для формування зони проникнення – у пластах відносно невеликої товщини (у середньому 3,8 м), де глинистість найбільш висока серед інших груп колекторів, а коефіцієнт газонасичення найменший – у середньому всього 0,57, що є ознакою погіршення фільтраційних властивостей і збільшення вмісту залишкової води. Зроблені висновки за даними нейтрального щодо суб'єктивного втручання статистичного методу аналізу є важливими і знаходяться певною мірою у невідповідності із загальноприйнятими уявленнями про розподіл зон проникнення в колекторах (Ахияров, 1975). Достатньо часто серед дослідників і фахівців з розробки нафтогазових родовищ існує думка, що напроти колекторів з великими значеннями коефіцієнтів пористості й проникності утворюються невеликі зони проникнення. Найбільші $D_{zn/dc}$ – напроти колекторів з підвищеною глинистістю, відносно малою пористістю, де у формуванні зони проникнення беруть участь капілярні сили тонких пор (Федин, 2001; Ягафаров та ін., 2010). Правда, є думка, яка підтверджується розрахунками (Гиматулинов, 1974; Федин, 2001), що глиниста кірка, яка утворюється напроти "якісних" колекторів на стінці свердловини, виконує роль осмотичного насоса і сприяє збільшенню діаметра зони проникнення фільтрату.

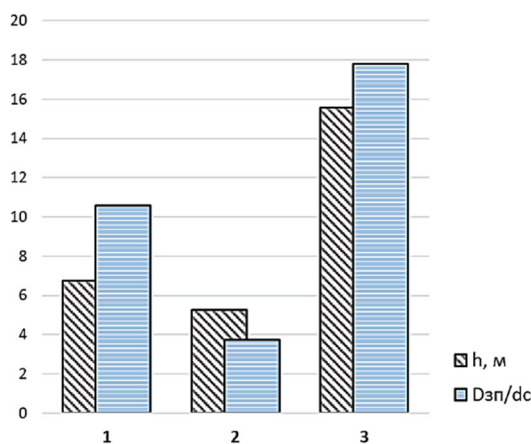


Рис. 4. Порівняльний розподіл середніх значень товщини і відносного діаметра зони проникнення залежно від номера виділеної групи пластів-колекторів. На осі абсцис указано номери груп / кластерів

На рис. 4 наведено порівняльний розподіл характерних середніх значень відносного діаметра зони проникнення і товщин пластів-колекторів по виділених трьох групах порід. Тут доволі яскраво виявляється основна закономірність – кореляція між двома характеристиками. Інші розглянуті параметри також перебувають у певній залежності від обраного класу порід і цілком закономірно визначають класність колекторів.

Висновки. Створення зони проникнення фільтрату промивної рідини в присвердловинному просторі після розкриття пласта при бурінні нафтогазової свердловини призводить до проблем під час діагностики порід за даними ГДС з метою виділення продуктивних об'єктів. Також ускладнюються умови для якісного проведення випробовування пластів, отримання реальних припливів вуглеводнів і під час освоєння свердловини. Методами промислової геофізики можливо отримати достовірну інформацію не лише про колекторські властивості порід розрізу, а й про геометричний розмір і параметри зони проникнення. З найменшими похибками визначається діаметр зони проникнення напроти пластів великої товщини та за умови значної різниці між значеннями питомого опору зони проникнення і незмінної частини пласта.

За результатами проведеного статистичного аналізу (кластерний і факторний аналізи) репрезентативної вибірки виявлено три групи порід, характерними ознаками яких є суттєві відмінності у величинах зони проникнення, товщини пластів, а також коефіцієнтів пористості й газонасичення. Установлено, що для теригенних розрізів з породами-колекторами гранулярного типу (серпуховський ярус) для одного родовища на прикладі п'яти свердловин існує максимальна пряма кореляція між величиною відносного діаметра зони проникнення і товщини пласта. Причому різке збільшення діаметра $D_{zn/dc}$ спостерігається для потужних пластів із середніми значеннями товщини 15,6 м. Для таких пластів також характерним є підвищені значення коефіцієнтів пористості й максимальні – коефіцієнта газонасичення. Проведені дослідження дозволяють робити прогностичні оцінки щодо наближених розподілів діаметрів зони проникнення в теригенних розрізах у разі безаварійного буріння з дотриманням технологічних умов проводки свердловин.

Подальші дослідження в цьому напрямі слід також пов'язувати з теригенними розрізами родовищ нафти і газу, які розташовані на різних глибинах і належать до різних літофаціальних умов формування (Рибалка, Карпенко, 2016; Вижва та ін., 2014). Дуже важливим, на думку авторів, є дослідження розподілів зони проникнення в ущільнених колекторах (Михайлов, Карпенко, 2020). Власне з такими колекторами пов'язані певні перспективи нагромадження запасів нафти і газу в Україні. Виявлення ущільнених нафтогазонасичених порід-колекторів, діагностика продуктивних колекторів на великих глибинах, за даними каротажу, ускладнюються внаслідок недосконалої інтерпретаційних підходів, відсутності надійних інтерпретаційних моделей для певних типів порід. Тому врахування прогностичних оцінок розмірів і параметрів зони проникнення в різних типах колекторів сприятиме підвищенню достовірності геофізичних висновків щодо продуктивності розрізів, зменшенню ризиків пропущення перспективних і нафтогазонасичених пластів/об'єктів.

Список використаних джерел

- Ахияров, В.Х. (1975). Особенности образования зоны проникновения и ее влияние на характеристику коллекторов в терригенном разрезе Западно-Сибирского равнины. Тюмень. *Труды ЗапсибНИГНИ*, 106, 151–162.
- Бойко, В.С. (2004). Розробка та експлуатація нафтових родовищ. К.: Реал-Принт, 695 с.
- 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)*. Геофизический журнал, 36, 1, 145–157.
- Гиматулинов, Ш.К. (1974). *Справочная книга по добыче нефти*. М.: Недра, 704 с.
- Ирбэ, В.А. (2011). Изучение разнородных от стенки скважины коллекторов с водами неодинаковой минерализации, определяемой в лаборатории и по данным ГИС. *Вестник недропользователя Ханты-Мансийского автономного округа*, 22.
- Красножон, М.Д., Косаченко, В.Д., Тульчинский, В.Г., Тульчинский, П.Г. (2007). Развитие технологии "Геопроис" для изучения нефтегазовых и рудных месторождений. *Каротажник*, 2(155), 50–67.
- Михайлов, В., Карпенко, О. (2020). Перспективы нетрадиционной нафтогазоносности Південної приобтової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1(88), 53–60.
- Рибалка, С., Карпенко, О. (2016). Колекторські властивості теригенних порід на великих глибинах центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1(72), 56–59.
- Таужнянский, Г.В. (2005). Современное состояние петрофизического и интерпретационного обеспечения определения подсчетных параметров месторождений нефти и газа Тюменской области. *Геофизика*, 4, 25–28.
- Федин, К.Л. (2001). Экспериментальные исследования процесса образования зоны проникновения в коллекторах нефти и газа и пути повышения эффективности ГИС: на примере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. *Дис. ... канд. геол.-минералог. наук*. М., 132 с.
- Ягафаров, А.К., Клещенко, И.И., Зозуля, Г.П. и др. (2010). Разработка нефтяных и газовых месторождений. Тюмень: ТюмГНГУ, 396 с.
- Myrontsov, M.L. (2012). A new method and program for multiprobe electric logging quantitative interpretation. *11th International Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Extended Abstracts*.

Myrontsov, M.L. (2019¹). The problem of equivalence in inverse electrometry problems of oil and gas wells. *18th International Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Extended Abstracts*.

Myrontsov, M.L. (2019²). Solution of the inverse problem of electrometry oil and gas wells (on the example of the BKZ + BK + IK complex). *18th International Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Extended Abstracts*.

Reference

Akhiyarov, V.Kh. (1975). Features of the formation of the invaded zone and its influence on the characteristics of reservoirs in the terrigenous section of the West Siberian Plain. Tyumen. *Proceedings of ZapSibNIGNI*, 106, 151–162.

Boyko, V.S. (2004). Development and operation of oil fields. K.: Real-Print.

Fedin, K.L. (2001). Experimental studies of invaded zone formation in oil and gas reservoirs and ways to improve the efficiency of well logging: on the example of the Timan-Pechora oil and gas province. *Thesis... Cand. Geol.-Min. Sci. M.*

Gimatudinov, Sh.K. (1974). Reference book on oil production. M.: Nedra.

Irbe, V.A. (2011). Study of reservoirs at different distances from the borehole wall with waters of unequal mineralization, determined in the laboratory and according to well logging data. *Bulletin of the subsoil user of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug*, 22.

Krasnozhen, M.D., Kosachenko, V.D., Tulchinsky, V.G., Tulchinsky, P.G. (2007). Development of the Geopisk technology for studying oil and gas and ore deposits. *Karotaznik*, 2 (155), 50–67.

Mykhailov, V., Karpenko, O. (2020). Prospects for non-traditional oil and gas potential of the Southern on-board zone of the Dnieper-Donets basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (88), 53–60.

Myrontsov, M.L. (2012). A new method and program for multiprobe electric logging quantitative interpretation. *11th International Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Extended Abstracts*.

Myrontsov, M.L. (2019¹). The problem of equivalence in inverse electrometry problems of oil and gas wells. *18th International Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Extended Abstracts*.

Myrontsov, M.L. (2019²). Solution of the inverse problem of electrometry oil and gas wells (on the example of the BKZ + BK + IK complex). *18th International Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Extended Abstracts*.

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

Tauzhnyanskiy, G.V. (2005). The current state of petrophysical and interpretation support for determining the estimated parameters of oil and gas fields in the Tyumen region. *Geophysics*, 4, 25–28.

Vyzhva, S.A., Mikhailov, V.A., Onishchuk, D.I., Onishchuk, I.I. (2014). Petrophysical parameters of rocks promising for shale gas (areas of the Eastern sector of the Dnieper-Donets basin). *Geophysical Journal*, 36, 1, 145–157.

Yagafarov, A.K., Kleschenko, I.I., Zozulya, G.P. et al. (2010). Development of oil and gas fields. Tyumen: TyumGNGU.

Надійшла до редколегії 02.09.2020

O. Karpenko, Dr.Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: karpenko.geol@gmail.com,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, Ukraine, 03022;
B. Sobol, Email: vasyi.sobol@dkz.gov.ua,
State Commission of Ukraine on Mineral Reserves;
M. Myrontsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher,
E-mail: myrontsov@ukr.net,
Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine;
I. Karpenko, PhD (Geol.),
E-mail: sharanskiy@gmail.com,
National Joint Stock Company "Naftogaz of Ukraine"

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GEOLOGICAL FACTORS ON THE DEPTH OF THE FILTRATE INVADIED ZONE AT THE PRIMARY DISCLOSURE OF GRANULAR RESERVOIRS ACCORDING TO THE WELL-LOGGING DATA

Possibilities of using the well-logging data for revealing the factors of the geological nature that influence the formation of invaded zone of a drilling mud filtrate at oil and gas wells drilling are considered. Electrical logging data were used with probes of different sizes and different types for adequate calculation of the relative diameter of the invaded zone. 5 wells from the gas condensate field were selected for analysis. The terrigenous section of the wells is represented by the alternation of argillites, siltstones and sandstones. Rocks reservoirs of granular type; the layers with thicknesses from 3,4 to 18,2 m were selected for analysis. The results of statistical analysis (cluster and factor analyzes) revealed 3 groups of rocks, the characteristic features of which are significantly different from the invaded zone, layer thickness and porosity and gas saturation coefficients. It is established that for terrigenous sections with reservoir rocks of granular type (Serpukhovian) for one field on the example of 5 wells there is a maximum direct correlation between the value of the relative diameter of the invaded zone and the thickness of the layers. The conducted researches allow making prognostic estimations concerning the approximate distributions of diameters of an invaded zone in terrigenous cuts in case of accident-free drilling with observance of technological conditions.

Keywords: reservoir rock, well logging, invaded zone, cluster analysis, relative diameter, electrical resistivity, porosity coefficient.

A. 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;
В. Соболев, E-mail: vasyi.sobol@dkz.gov.ua,
Государственная комиссия Украины по запасам полезных ископаемых;
Н. Миронцов, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: myrontsov@ukr.net,
Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины;
И. Карпенко, канд. геол. наук,
E-mail: sharanskiy@gmail.com,
Национальная акционерная компания "Нафтогаз Украины"

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ГЛУБИНУ ЗОНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ФИЛЬТРАТА ПРИ ПЕРВИЧНОМ ВСКРЫТИИ ГРАНУЛЯРНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПО ДАННЫМ ГИС

Рассмотрены возможности использования данных геофизических исследований скважин для выявления факторов геологической природы, влияющих на формирование зоны проникновения фильтрата промывочной жидкости при бурении нефтегазовых скважин. Использованы данные электрического каротажа зондами различных размеров и типов для адекватного расчета относительного диаметра зоны проникновения. Для анализа отобраны пять скважин газоконденсатного месторождения. Терригенный разрез скважин представлен чередованием аргиллитов, алевролитов и песчаников. Породы-коллекторы – гранулярного типа; отобраны для анализа пласты с толщинами от 3,4 до 18,2 м. По результатам статистического анализа (кластерный и факторный анализы) выявлены три группы пород, характерными признаками которых являются существенные различия в величинах зоны проникновения, толщинах пластов, а также коэффициентов пористости и газонасыщенности. Установлено, что для терригенных разрезов с породами-коллекторами гранулярного типа (серпуховский ярус) для одного месторождения на примере пяти скважин существует максимально прямая корреляция между величиной относительного диаметра зоны проникновения и толщиной пласта. Проведенные исследования позволяют делать прогнозные оценки относительно приближенных распределений диаметров зоны проникновения в терригенных разрезах в случае безаварийного бурения с соблюдением технологических условий проводки скважин.

Ключевые слова: порода-коллектор, геофизические исследования скважин, зона проникновения, кластерный анализ, относительный диаметр, удельное электрическое сопротивление, коэффициент пористости.

УДК 550.38

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.03>

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

E-mail: vaqifqurbanov@mail.ru,

Институт нефти и газа Национальной академии наук Азербайджана;

Л. Султанов, науч. сотруд.,

E-mail: latif.sultan@mail.ru,

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТЛОЖЕНИЙ ПРОДУКТИВНОЙ ТОЛЩИ СЕВЕРНЫХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПЛОЩАДЕЙ БАКИНСКОГО АРХИПЕЛАГА

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

Приведены комплексные результаты петрофизических исследований пород, взятых из поисково-разведочных скважин площадей Дуванны-дениз, Сангачалы-дениз, Булла-дениз, Аляти-дениз, Гарасу и др., где широко распространены отложения продуктивной толщи. Установлены вариации значений гранулометрического состава пород в разрезе продуктивной толщи указанных выше площадей. Также пересмотрены вопросы зависимости проницаемости от пористости и от глубины залегания.

В частности, были изучены коллекторские свойства пород продуктивной толщи, в результате чего получены данные, отражающие их вариацию по площади, в пространстве и во времени. Это позволило разделить различные типы пород-коллекторов, установить закономерность их распространения и изменения пористости по разрезу. Так, согласно результатам разных петрофизических методов исследований коллекторские свойства пород в целом ухудшаются с глубиной. Однако в отдельных случаях в глинистых и карбонатных породах при относительно жестких термобарических условиях коллекторские свойства могут улучшиться за счет появления вторичной пористости. Построены и проанализированы графики изменения коллекторских свойств с глубиной и гистограммы распределения среднего значения гранулометрического состава пород продуктивной толщи по разрезу северных площадей Бакинского архипелага, также рассмотрены вопросы зависимости пористости и проницаемости пород от их глубины залегания и литофациального состава. Исследования показывают, что физические особенности однообразных и одноименных пород изменяются в результате геолого-физических процессов, приводя к различным результатам. Отмечено, что в связи с изменением литологического состава пород с запада на восток их пористость и проницаемость возрастают с северо-запада на юго-восток.

Ключевые слова: породы, пористость, плотность, петрофизика, карбонатность, нефть, залежь, скважина, распространение ультразвуковых волн.

Постановка проблемы. Уникальность Южно-Каспийского бассейна (ЮКБ) и богатые углеводородные ресурсы издавна привлекали к себе внимание исследователей. Многочисленными наблюдениями было установлено, что углеводородный потенциал многих месторождений, особенно в глубокозалегающих горизонтах, из-за отсутствия подробных данных о литофациальных и петрофизических свойствах коллекторов не был достаточно оценен (Составление каталога..., 2010). Ввиду этого подробное изучение нефтегазоносных коллекторов продуктивной толщи в пределах возможностей современных петрофизических методов и данных ГИС остается весьма актуальным. При определении нефтегазоносных объектов и перспективных структур одной из важных задач является изучение коллекторских свойств пород. В Азербайджане выявлены и сданы в эксплуатацию богатые месторождения нефти и газа, однако для получения более точной информации о нефтегазоносности некоторых структур и уточнения их геологического строения важным остается изучение петрофизических свойств пород. Последние играют существенную роль при поисках, разведке, разработке нефтегазовых месторождений и оценке их потенциала. Вследствие этого проведение таких исследований по продуктивной толще (ПТ) (нижний плиоцен) нефтегазоносных северных площадей Бакинского архипелага, относящегося к одному из высокоперспективных акваторий Южно-Каспийского бассейна (рис. 1), является весьма актуальным.

Нами приведены результаты комплексных исследований образцов пород, взятых из поисково-разведочных скважин, пробуренных на месторождениях Сангачалы-дениз, Дуванны-дениз, Булла-дениз, Алят-дениз и т.д., расположенных на Бакинском архипелаге, где хорошо развиты отложения ПТ.

Были рассмотрены особенности изменения плотности (σ , г/м³), пористости (K_p), карбонатности (%) и проницаемости (10^{-15} м²) горных пород, скорости распространения ультразвуковых волн (V , м/с), построены и

проанализированы гистограммы средних значений гранулометрического состава пород рассматриваемых площадей (рис. 2).

Как следует из гистограмм, площадное распределение среднего значения гранулометрического состава ПТ северных площадей Бакинского архипелага имеет ассиметричную форму (рис. 2). Наиболее широким площадным распространением с высоким процентным содержанием обладает фракция с размерами зерен в интервале 0,1–0,01 мм, что свидетельствует о преобладании в разрезе алевритовой фации.

Анализ предыдущих исследований. Согласно гистограммам (рис. 2) среднее значение гранулометрического состава пород ПТ по северным площадям Бакинского архипелага представлено в основном алевритами, мелко- и среднезернистыми песчаниками. При этом процентное содержание алевритов в целом возрастает с севера на юг акватории, а песчаных фракций – с юга на север. В свою очередь максимальное содержание глин наблюдается на площади Умид, расположенной в относительно глубоководной части архипелага. Другая закономерность прослеживается по простиранию антиклинальных зон, в которые входят рассматриваемые локальные поднятия. Так, с северо-запада на юго-восток по всем трем антиклинальным зонам: 1) Сангачалы-дениз, Дуванны-дениз, Хара-Зира; 2) Алят-дениз, Булла-дениз-Умид; 3) Хамамдаг-дениз – Гарасу, Санги-Мугань алевритовая и глинистая фракции в двух первых возрастают с северо-запада на юго-восток, т. е. в направлении возрастания глубины бассейна, тогда как песчаники всех фракций (0,25–0,1 и > 0,25) закономерно убывают в этом же направлении. Не совсем упорядоченный характер распределения фаций в субмеридиональном направлении территории северных антиклинальных зон Бакинского архипелага, представленный на гистограмме, может быть связан с рядом палеогеографических и палеоструктурных условий. Так, например, рассматриваемые структуры находятся в ос-

новном в зоне шельфа или в относительно неглубоководной части бассейна. Об этом же свидетельствует доминирование в разрезе псаммитовых и алевритовых фаций. Следующим фактором могут послужить прибрежные донные течения, характерные для Южного Каспия, на которые определенное влияние оказывают и господствующие направления ветров, дующих над Апшероном и в целом на Южном Каспии. Определенную роль в этом процессе может сыграть и впадение реки Куры в Южный Каспий на юге Бакинского архипелага. В свою очередь известно, что с конца миоцена и начала плиоцена, в силу сложившегося в регионе геодинамического режима,

Южный Каспий находится в условиях сжимающих напряжений (Абасов и др., 2007; Ахмедов, 2008), что не исключает вероятности скучивания осадков. Наконец, конседиментационный характер развития рассматриваемых локальных поднятий имеет непосредственное влияние на распределение фаций. Так, известно, что при конседиментационном развитии, если рост поднятия опережает скорость осадконакопления, то свод структуры подвергается эрозии, приводящей к нарушению общей закономерности площадного распределения фаций.

Ниже приведены результаты исследований рассматриваемых петрофизических параметров пород по отдельным площадям Бакинского архипелага.



Рис. 1. Исследуемые площади на севере Бакинского архипелага

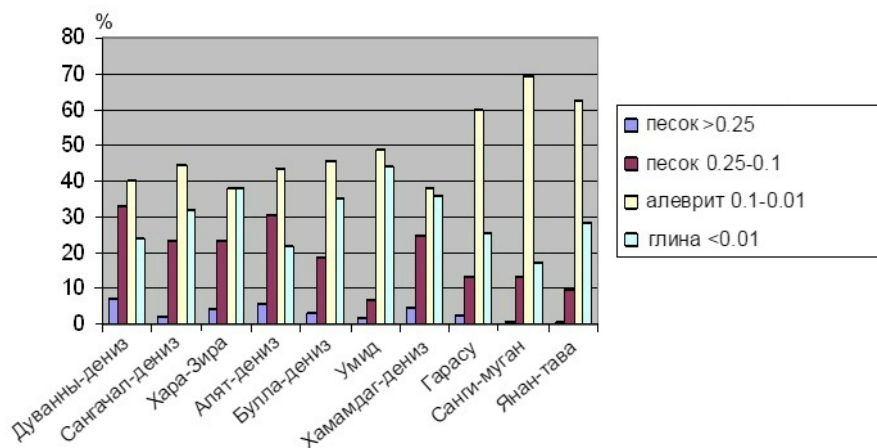


Рис. 2. Гистограммы распределения среднего значения гранулометрического состава пород ПТ северных площадей Бакинского архипелага

Нефтегазоконденсатные месторождения Сангачалы-дениз – Дуванны-дениз – о. Хара-Зира расположены на севере Бакинского архипелага и входят в единую антиклинальную зону, поэтому их можно рассматривать комплексно. Здесь наибольшая мощность отложений ПТ, вскрытая скважинами, составляет 3950–4000 м, а наименьшая – 3000 м. На севере Бакинского архипелага плотность глинистых отложений изменяется в пределах 2,26–2,50 г/см³, пористость – 9,5–18 % (в некоторых случаях достигает 30 %), скорость распространения ультразвуковых волн – 2200–2300 м/с. Плотность алевролитов составляет 2,16–2,63 г/см³, пористость – 15–30 %, скорость распространения ультразвуковых волн изменяется в пределах 1500–2500 м/с. Плотность песчаников изменяется от 2,07 до 2,55 г/см³, пористость – 8,2–22,5 %. Как и в других породах, скорость распространения ультразвуковых волн в песчаниках зависит от их минералогического состава, цементного материала, плотности и других факторов. Вследствие этого она изменяется в пределах 1950–4000 м/с. Физические свойства карбонатных глин ПТ характеризуются следующими величинами: плотности – 2,05–2,65 г/см³, пористости – 8,5–30 % и скорости распространения ультразвуковых волн – 2100–4000 м/с. Результаты обработки и интерпретации петрофизических и промыслово-геофизических данных позволяют сказать, что отдельные горизонты ПТ являются достаточно перспективными, т.е. нефтегазоносность некоторых из них более перспективна, чем предполагалось. Пробуренные

на всех площадях скважины вскрыли полную мощность ПТ (3950–4000 м) на месторождениях Сангачалы-дениз и о. Хара-Зира. На гипсометрически высоко расположенных локальных структурах Сангачалы-дениз и Дуванны-дениз мощность ПТ составляет 2960–3600 м. (Бабаев, 1991).

Нефтегазовое месторождение Алят-дениз расположено на северо-западе Бакинского архипелага. На этой площади вскрыты все свиты ПТ, за исключением калинской. Отложения ПТ состоят в основном из глин, песчаников и алевролитов. Плотность глинистых пород составляет 1,90–2,20 г/см³, пористость – 7,5–27,0 %, скорость распространения ультразвуковых волн – 1250–2200 м/с. Плотность песчаников варьирует в пределах 2,14–2,48 г/см³, пористость – 6,5–20,5 %, скорость распространения ультразвуковых волн – 1800–3000 м/с. Плотность алевролитов составляет 2,06–2,45 г/см³, пористость – 9,1–23,9 %, скорость распространения ультразвуковых волн – 1900–2100 м/с.

Зависимость пористости и проницаемости от глубины залегания пород на месторождении Алят-дениз показана на рис. 3. Как следует из графиков, представленных на рис. 3, б, пористость у глин и песчаников уменьшается с глубиной в связи с нарастанием геостатического давления. Наряду с этим в породах ПТ, представленных терригенными отложениями, прослеживается прямая зависимость между проницаемостью и пористостью (рис. 3, а), что более характерно для терригенных коллекторов (Шакаров и др., 2010).

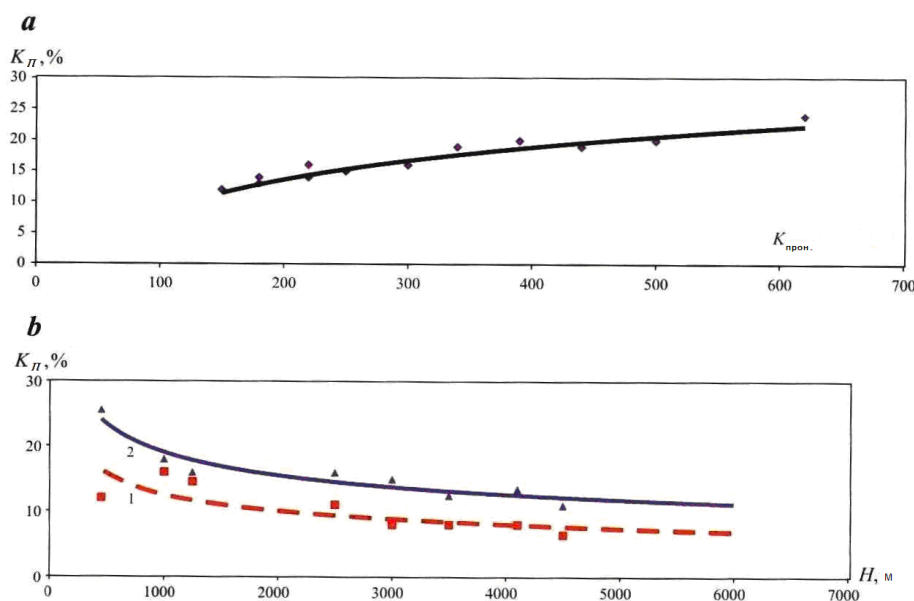


Рис. 3. Зависимость проницаемости и пористости от глубины залегания терригенных пород на месторождении Алят-дениз: 1 – глинистые отложения; 2 – песчаные отложения

Установленное по керновым материалам значение проницаемости относительно невелико. Для определения изменения зависимости этого параметра от пористости была построена корреляционная схема. Однако эта связь носит несколько условный характер. Известно, что любая проницаемая порода обладает пористостью, однако не каждая порода, обладающая пористостью, может быть проницаемой. В свою очередь было установлено, что в пределах площади Алят-дениз с северо-запада на юго-восток значение проницаемости увеличивается. Примечательно, что, как было отмечено выше, в этом же направлении происходит нарастание алевроитовой и глинистой фракций. Такое несоответствие может быть связано с количественным соотношением между фракциями, нарастающими в указанном направлении.

Для оценки фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов глубоких пластов месторождения Алят-дениз была рассмотрена зависимость изменения проницаемости от глубины. Анализ керна материала и данных ОГТ позволили выявить здесь некоторое несоответствие.

Расположенное на юго-западе Бакинского архипелага нефтяное месторождение Гарасу относится к наиболее изученным и охватывает территорию острова Гарасу и прилегающую акваторию. Поднятие Гарасу, как было отмечено, относится к антиклинальной зоне, протянувшейся с северо-запада на юго-восток через поднятие Хамамдаг-дениз далее в открытое море. Здесь отложения ПТ представлены в основном глинами, пес-

чаниками и алевролитами. Объектом основного внимания на данной площади являются отложения ПТ. Плотность глинистых пород месторождения составляет 1,80–2,35 г/см³, пористость – 9,4–30,5 %, а скорость распространения ультразвуковых волн – 1600–3500 м/с (Успенская, 1972; Султанов и др., 2015).

Поскольку механизм формирования и геологическое строение локальных поднятий и приуроченных к ним месторождений Бакинского архипелага схожи, приведенные выше результаты исследований можно отнести и к месторождениям Хамамдаг, Умид, Санги-Мугань, Гильадасы и другим северным площадям архипелага. В пределах последнего отложения ПТ состоят в основном из чередования песчаников, алевролитов и глин. На одних площадях наблюдается преобладание песчаной фракции над алевритовой, а на других – глинистой относительно алевритовой (рис. 2).

Корреляция графиков изменения рассматриваемых петрофизических параметров с глубиной позволила

установить следующие зависимости пористости и проницаемости от фракционного состава и карбонатности пород. Как следует из графиков (рис. 4), до глубины 4580 м в гранулометрическом составе пород в целом происходит существенное нарастание псаммитовой фации с одновременным убыванием алевритовой и пелитовой фракций с незначительными колебаниями значений карбонатности. В результате на фоне незначительного увеличения пористости произошло относительно резкое возрастание проницаемости (до 122,0–185,5 $\times 10^{-15}$ м²), что, очевидно связано с вышеотмеченным изменением гранулометрического состава пород. При этом в интервале глубин 2564–3401 м породы характеризуются низкими значениями содержания псаммитовой и повышенным содержанием алевритопелитовой фаций. Очевидно такой фракционный состав и является причиной почти полного отсутствия в них проницаемости (0,9–2,3 $\times 10^{-15}$ м²).

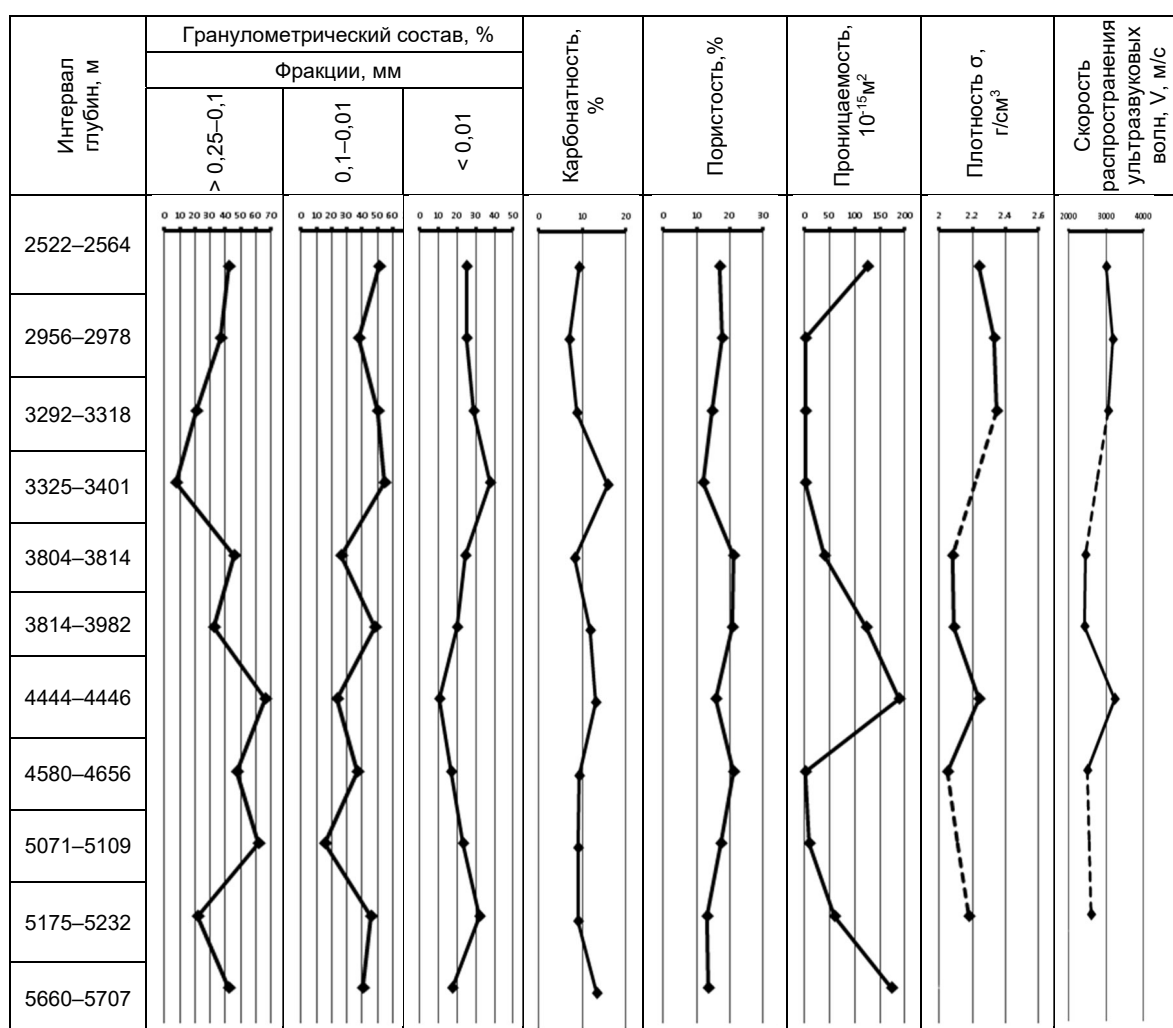


Рис. 4. График изменения гранулометрических и коллекторских свойств отложений ПТ северных площадей Бакинского архипелага с глубиной

Далее, в интервале глубин 3401–4580 м резкое возрастание псаммитовой фации до 66,2 %, уменьшение алеврито-пелитовой также способствовало относительно резкому возрастанию проницаемости пород (32,2–188,5 $\times 10^{-15}$ м²). С глубины 4580 до 4656 м содержание псаммитовой фации в породах уменьшается до 47,3 % с одновременным нарастанием алевритопелитовой фракции и карбонатности. Такое изменение фракционного состава привело к резкому падению

проницаемости до 2,23 $\times 10^{-15}$ м², что можно считать закономерным для гранулярных резервуаров.

В интервале глубин 4656–5109 м вновь происходит возрастание псаммитовой фации до 61,4 % с относительно резким падением содержания алевритов до 15,43 % и с незначительным возрастанием пелитовой фракции до 15,43 %. Такое сочетание рассматриваемых фракций привело к незначительному уменьшению пористости и возрастанию проницаемости всего до 9,5 $\times 10^{-15}$ м².

В интервале глубин 5175–5232 м происходит резкое уменьшение содержания псаммитов до 22,16 %, трехкратное возрастание алевроитовой и почти на 10 % увеличение пелитовой фации при их относительно низкой карбонатности, что привело к возрастанию проницаемости до $59,33 \times 10^{-15} \text{ м}^2$.

Далее, в интервале глубин 5660–5702 м в очередной раз псаммитовая фация возрастает до 42,65 %, алевроиты уменьшаются до 40,02 % и почти в два раза убывает пелитовая фракция, составив всего 17,35 %, незначительно возрастает также карбонатность. В результате при пористости 13,65 % проницаемость пород возросла до $173,0 \times 10^{-15} \text{ м}^2$.

Из приведенного анализа следует, что в рассмотренных гранулярных резервуарах исследуемой территории пористость, и в особенности проницаемость пород, контролируется в основном количественным содержанием псаммито-алевритовой и особенно псаммитовой фаций. Такая зависимость коллекторских свойств пород свидетельствует о незначительном развитии или полном отсутствии в них вторичной пористости, связанной с трещиноватостью, кавернозностью и т.д. В свою очередь низкая карбонатность исключает вероятность процесса выщелачивания, который способствует возрастанию коллекторских характеристик в основном у карбонатных пород. Об отсутствии этого процесса в рассматриваемых породах свидетельствует не только их низкая карбонатность, но также их низкие коллекторские свойства.

В связи с прямой зависимостью между изменением плотности пород и скоростью прохождения ультразвуковых волн, как видно из графиков, они хорошо коррелируются между собой. Однако между литофациальными, коллекторскими и отмеченными физическими параметрами пород в рассматриваемом случае более или менее ясно выраженной зависимости не наблюдается.

Из вышеизложенного следует, что с целью уточнения нефтегазоносности отдельных структур Бакинского архипелага необходимо проведение дополнительных геолого-геофизических работ (гравимагнитометрической, электрометрической, сейсмической разведки и петрофизических исследований) с последующим заложением глубоких поисково-разведочных скважин с целью выявления новых скоплений нефти и газа.

Эти работы позволяют более эффективно изучать коллекторские свойства глубокопогруженных нефтегазоводоносных толщ и структурно-тектоническое строение рассмотренных площадей.

Выводы. Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- в пределах исследуемых морских площадей изменение петрографических величин в широком диапазоне связано в основном с литологической неоднородностью комплексов, разной глубиной залегания пластов и структурно-тектоническими условиями;

- хорошая корреляционная связь между пористостью и проницаемостью связана с терригенным составом, литофациальной идентичностью и близостью значений пористости пород-коллекторов, а относительно высокие значения проницаемости пород связаны с повышенным содержанием в них псаммит-алевритовых фракций;

- при прогнозировании нефтегазоносности глубокопогруженных толщ подобных структур, наряду с оптимальными геофизическими методами разведки, необходимо учитывать и фильтрационно-емкостные характеристики пород;

- изменение плотности пород и скорости ультразвуковых волн с глубиной указывают на их хорошую коррелируемость и отсутствие таковой между ними и коллекторскими свойствами пород, что свидетельствует в основном об отсутствии в породах-коллекторах вторичной пористости.

Список использованных источников

Абасов, М., Кондрушкин, Ю., Алиев, Р., Крутых, Л. (2007). Изучение и прогнозирование параметров сложных природных резервуаров нефти и газа Южно-Каспийской впадины. Баку: "Nafta-Press".

Ахмедов, А. (2008). О геологической характеристике и перспективах нефтегазоносности площади Умид. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 3, 19–22.

Бабаев, М. (1991). Коллекторские параметры пород выбросов грязевых вулканов Бакинского архипелага (на примере о. Дуванны и о. Булла). *Тематический сборник научных трудов*. Баку: Изд. Азерб. ИУ, 82–84.

Составление каталога коллекторских свойств мезокайнозойских отложений месторождений нефти-газа и перспективных структур Азербайджана. (2010). *Отчет Научно-исследовательского института геофизики*. Баку: Фонды Управления Геофизики и Геологии.

Султанов, Л., Валиев, С. и др. (2015). Литолого-петрографические и коллекторские характеристики мезокайнозойских отложений северо-западной части Южно-Каспийской впадины. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, 17, 5–15.

Успенская, Н., Таусон, Н. (1972). Нефтегазоносные провинции и области зарубежных стран. М.: Недра.

Шакаров, Х., Кязимов, Р., Султанов, Л. (2010). О коллекторских свойствах VII горизонта продуктивной толщи месторождения Алят-дениз. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*, 5, 6–9.

References

Abasov, M., Kondrushkin, Y., Aliyev, R., Krutykh, L. (2007). Study and forecasting of the parameters of complex natural oil and gas reservoirs in the South Caspian depression. Baku, "Nafta-Press".

Akhmedov, A. (2008). On the geological and prospects of oil and gas potential of the Umid area. *Azerbaijan Oil characteristics Industry*, 3, 19–22.

Babaev, M. (1991). Reservoir parameters of rocks emitted from mud volcanoes of the Baku archipelago. (on the example of Duvanna Island and Bull Island). *Thematic collection of scientific papers*. Baku: Ed. Azerb. IWU, 82–84.

Compilation of a catalog of reservoir properties of Meso-Cenozoic deposits of oil-gas fields and promising structures of Azerbaijan. (2010). *Report of the Research Institute of Geophysics*. Baku: Funds of the Department of Geophysics and Geology.

Shakarov, Kh., Kazimov, R., Sultanov, L. (2010). On reservoir VI horizons of the productive strata of the Alat-Deniz deposit. *Azerbaijan Oil Industry*, 5, 6–9.

Sultanov, L., Valiev, S. et al. (2015). Lithological-petrographic and reservoir characteristics of Meso-Cenozoic sediments in the north-western part of the South Caspian depression. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 17, 5–15.

Uspenskaya, N., Tauson, N. (1972). Oil and gas provinces and regions of foreign countries. M.: Nedra.

Надійшла до редакції 11.06.2020

V. Gurbanov, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof., Deputy Director,
E-mail: vaqifgurbanov@mail.ru,
Institute of Oil and Gas of the National Academy of Sciences of Azerbaijan;
L. Sultanov, Researcher,
E-mail: latif.sultan@mai.ru,
Azerbaijan State University of Oil and Industry

RESULTS OF PETROPHYSICAL STUDIES OF THE PRODUCTIVE STRATUM DEPOSITS OF THE BAKU ARCHIPELAGO NORTHERN OIL AND GAS BEARING AREAS

The complex results of petrophysical testing of rocks, taken from prospecting-development wells of Duvanni-deniz, Sangachal-deniz, Bulla-deniz, Garasu and etc. areas, where the sediments of productive stratum are widely expanded, have been given.

Average values of granulometric composition of rocks of productive unit of the above areas by the section have been recounted. The problem of dependence of permeability on porosity and depth was solved.

Dependence between physical parameters for the individual kinds of rocks, dependence between physical properties and material structures are established. The results of various petrophysical research methods show that the filtration capacitance properties, in general, deteriorate with depth.

However, in certain cases, in clay and carbonate rocks, reservoir properties can improve, due to the appearance of secondary porosity under relatively stringent thermobaric conditions.

The histograms, which consist of average values of granulometric composition of productive stratum rocks when crossing some places of archipelago are constructed, the problems of dependence of permeability on porosity and depth were solved. The researches showed, that the physical process of the same- named and same-aged features rocks change in the result of geological-physical processes, getting different values. It's noticed, that the porosity and permeability are increasing from north-west to south-east by changing lithological composition.

Keywords: deposits, suit, porosity, deep, well, density, petrophysics, criterion, oil, deposit, wave propagation velocity

В. Гурбанов, д-р геол.-мінералог. наук, проф., заст. директора,

E-mail: vaqifqurbanov@mail.ru,

Інститут нафти та газу Національної академії наук Азербайджану;

Л. Султанов, наук. співроб.,

E-mail: latif.sultan@mail.ru,

Азербайджанський державний університет нафти та промисловості

РЕЗУЛЬТАТИ ПЕТРОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІДКЛАДЕНЬ ПРОДУКТИВНОЇ ТОВЩІ ПІВНІЧНИХ НАФТОГАЗОНОСНИХ ПЛОЩ БАКИНСЬКОГО АРХІПЕЛАГУ

Наведено комплексні результати петрофізичних досліджень порід, отриманих з пошуково-розвідувальних свердловин площ Дуванна-Деніз, Сангачали-Деніз, Булла-Деніз, Аляти-Деніз, Гарас та ін., де поширені відклади продуктивної товщі. Установлено варіації значень гранулометричного складу порід у розрізі продуктивної товщі зазначених вище площ. Також переглянуто питання залежності проникності від пористості й від глибини залягання.

Зокрема, були вивчені колекторські властивості порід продуктивної товщі, у результаті чого отримано дані, що відображають їхню варіацію по площі, у просторі і в часі. Це дозволило розділити різні типи порід-колекторів, установити закономірність їхнього поширення і зміни пористості по розрізу. Так, згідно з результатами різних петрофізичних методів досліджень колекторські властивості порід загалом погіршуються з глибиною. Однак в окремих випадках у глинистих і карбонатних породах за відносно жорстких термобаричних умов колекторські властивості можуть поліпшуватися за рахунок появи вторинної пористості. Побудовано та проаналізовано графіки зміни колекторських властивостей з глибиною і гістограми розподілу середнього значення гранулометричного складу порід продуктивної товщі по розрізу північних площ Бакинського архіпелагу, також розглянуто питання залежності пористості й проникності порід від їхньої глибини залягання і літофаціального складу. Дослідження демонструють, що фізичні особливості одновікових і однойменних порід змінюються в результаті геолого-фізичних процесів, приводячи до різних наслідків. Відзначено, що у зв'язку зі зміною літологічного складу порід із заходу на схід їхня пористість і проникність зростають з північного заходу на південний схід.

Ключові слова: породи, пористість, щільність, петрофізика, карбонатність, нафта, поклад, свердловина, поширення ультразвукових хвиль.

УДК 550.374

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.04>Я. Глоба^{1,3}, асп., заст. голов. геофізика,
E-mail: globa_yaroslav@ukr.net;Р. Глоба^{2,3}, асп., геофізик з обробки даних,
E-mail: hloba_roman@ukr.net;М. Рева³, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;С. Вижва³, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;¹Товариство з обмеженою відповідальністю "Ентерпрайз ЛТД"
пр. Оболонський, 54, оф. літера А, м. Київ, 04214, Україна²Товариство з обмеженою відповідальністю "Вікоіл ЛТД"
вул. Кудрявський узвіз, 7, оф. 211, м. Київ, 04053, Україна³Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ІНТЕРПРЕТАЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ ДЖЕРЕЛ ДИСКОВОГО ТИПУ

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

У результаті старіння шару захисної ізоляції підземних трубопроводів, яке відбувається під дією зовнішніх факторів, в ізоляційному захисному шарі можуть утворюватися місця, де ізоляція порушується настільки, що відбувається витік електричного струму під дією захисного потенціалу труби. Ці процеси призводять до зменшення захисного потенціалу підземних трубопроводів, а отже до погіршення захищеності підземних комунікацій. Такі місця пошкоджень фіксуються зйомкою розподілу електричного потенціалу "труба-земля" (U_{ms}) вздовж траси трубопроводу способом виносного електрода і вимірами "поперечного та поздовжнього градієнтів" електричного поля. Оскільки місця витоку електричного струму є джерелами електричних полів, то важливо знати особливості цих полів з метою оцінки ступеня і розмірів пошкоджень. З принципової точки зору це питання зводиться до розв'язку оберненої задачі електрометрії для полів, створюваних джерелами різної структури. У разі деталізації аномалій дані електрометричної зйомки бажано отримувати з точністю, яка дозволяє застосовувати для їхньої кількісної інтерпретації способи, що ґрунтуються на аналітичних співвідношеннях для аномалій цих параметрів. У даній роботі виконано аналіз можливостей використання для інтерпретації аномального поля, спричиненого джерелом витоку струму з пошкодження дискового типу, способів, застосовуваних для полів, створюваних точковими джерелами.

Ключові слова: точкове джерело, джерело дискового типу, потенціал, сила витоку струму.

Постановка проблеми. Метою обстеження стану електрохімізахисту трубопроводів електрометричними методами є загальна оцінка захисного електричного потенціалу вздовж траси трубопроводу, що забезпечується станціями катодного захисту, та фіксація ділянок пошкоджень ізоляційного покриття підземних комунікацій. Такі місця пошкоджень фіксуються зйомкою розподілу електричного потенціалу "труба-земля" (U_{ms}) вздовж траси трубопроводу і так званих "поперечного та поздовжнього градієнтів" електричного поля, які являють собою різниці потенціалів ΔU_{MN} , вимірювані лінією MN з розміром 5–10 м, зорієнтованою поперек і вздовж траси трубопроводу. За наявності пошкоджень ізоляції під дією захисного потенціалу відбувається витік електричного струму із трубопроводу, у результаті чого утворюється аномальне електричне поле. Важливо не тільки зафіксувати місце пошкодження, але й оцінити його просторове положення та ступінь пошкодження за силою витоку струму. З принципової точки зору це завдання вирішується шляхом розв'язання оберненої задачі електрометрії, тобто шляхом інтерпретації зафіксованого аномального поля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує низка публікацій, присвячених застосуванню методів електрометрії для визначення місць і ступеня пошкоджень в інженерних спорудах (Глоба Р. та ін., 2016, 2017; Глоба Я. та ін., 2017, 2019; Рева та ін., 2019; Калькутін та ін., 2012; Лукович, 2011). Більшість публікацій присвячена розгляду принципів питань електрохімізахисту значних за розміром ділянок підземних комунікацій.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. У роботах, присвячених проблемам електрохімізахисту підземних трубопроводів, мало уваги приділяється детальному дослідженню окремих локальних місць пошкодження ізоляційного покриття. Стаття присвячена аналізу електричного поля, створюваного дисковим витокм струму як одного із варіантів виду пошкодження ізоляційного покриття підземних трубопроводів, і розробці принципів основ інтерпретації аномального електричного поля з метою визначення

просторового положення пошкодження, його розмірів і сили витоку струму.

Мета досліджень. Аналіз поля дискового витоку струму і його інтерпретаційних можливостей щодо визначення глибини, сили витоку струму та розмірів джерела. Порівняльний аналіз електричних полів дискового та точкового джерел з метою встановлення умов їхньої збіжності, за яких можливе використання для визначення глибини до джерела та сили струму витоку більш простих алгоритмів поля точкового джерела.

Теорія. Інтерпретація просторового розподілу параметрів електричних полів (потенціалу та його поздовжнього й поперечного градієнтів) будь-якого джерела полягає у визначенні його просторового положення та розмірів. Для джерел дискового типу такими інтерпретаційними параметрами є положення його епіцентра, глибина розташування h та радіус r_0 . Що стосується визначення просторового положення епіцентра, то він визначається за характерними особливостями розподілу потенціалу електричного поля вздовж епіцентрального профілю, а саме – за точкою його екстремального значення, а також за точкою переходу через нуль графіка поздовжнього градієнта.

Електричне поле дискового джерела струму за своєю просторовою симетрією близьке до структури поля точкового джерела, принаймні на певних відстанях. Зважаючи на це, є сенс виконати порівнюваний аналіз полів цих двох джерел з точки зору оцінювання інтерпретаційних можливостей самих полів дискових витоків струму та можливостей застосування в процесі інтерпретації полів дискових джерел інтерпретаційних алгоритмів, застосовуваних для інтерпретації полів точкових джерел.

Нормальне електричне поле дискового джерела струму. Наведемо короткий опис розв'язку задачі про нормальне поле дискового джерела. Припустимо, що в однорідному просторі з питомим опором ρ розташований диск із радіусом r_0 , з поверхні якого стікає струм сили I (рис. 1). Припускаємо також, що поверхня диска є еквіпотенціальною (ізоповерхнею). Необхідно знайти функцію

просторового розподілу потенціалу електричного поля U , створеного джерелом такого дискового типу.

Сформульовану задачу доречно розв'язувати в циліндричній системі координат (r, φ, z) з початком в центрі дискової поверхні (рис. 1), оскільки цій задачі властива осьова симетрія (незалежність потенціалу від азимутального кута φ). Розв'язання сформульованої задачі зводиться до визначення потенціалу електричного поля в довільній точці простору $M(r, \varphi, z)$.

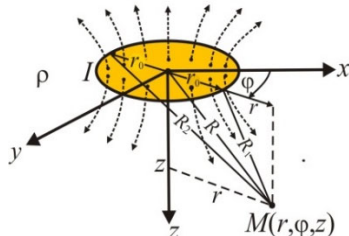


Рис. 1. Дискове джерело струму в однорідному просторі:
.....► – струмові лінії

Очевидно, що для функції просторового розподілу потенціалу електричного поля $U(r, z)$ повинні виконуватися три умови:

1) потенціальна функція U задовольняє осесиметричне рівняння Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0; \quad (1)$$

2) у зв'язку з тим, що в нескінченності потенціал електричного поля дискового витoku струму відповідає потенціалу поля точкового джерела, для функції U має виконуватися така крайова умова:

$$U(r, z)|_{R \rightarrow \infty} = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{R} = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}}; \quad (2)$$

3) з екіпотенціальності дискової поверхні витoku струму випливає третя умова:

$$U(r, z)|_{z=0} = \text{const}. \quad (3)$$

Загальним розв'язком осесиметричного рівняння Лапласа (1) є інтеграл Фурє–Бесселя виду

$$U(r, z) = \int_0^\infty B(m) e^{-m|z|} J_0(mr) dm, \quad (4)$$

де J_0 – функція Бесселя, $B(m)$ – невідома функція. Вибір функції $B(m)$ має бути таким, щоб інтеграл (4) задовольняв умови (2) і (3).

Серед інтегралів Фурє–Бесселя є такий інтеграл (Прудников А. П. і др., 1983):

$$IN = \int_0^\infty \frac{\sin(mr_0)}{m} e^{-m|z|} J_0(mr) dm = \arcsin \frac{2r_0}{\sqrt{(r+r_0)^2 + z^2} + \sqrt{(r-r_0)^2 + z^2}}. \quad (5)$$

Його властивості повністю задовольняють умови (2) і (3), які мають виконуватися для шуканої потенціальної функції, а саме:

$$IN|_{R \rightarrow \infty} = \frac{r_0}{R} = \frac{r_0}{\sqrt{r^2 + z^2}}; \quad IN|_{z=0} = \frac{\pi}{2} = \text{const}. \quad (6)$$

Отже цілком виправданим буде вибір загального розв'язку сформульованої вище задачі у вигляді

$$U(r, z) = C \int_0^\infty \frac{\sin(mr_0)}{m} e^{-m|z|} J_0(mr) dm = C \cdot \arcsin \frac{2r_0}{\sqrt{(r-r_0)^2 + z^2} + \sqrt{(r+r_0)^2 + z^2}},$$

де C – невідома стала. Ця стала просто визначається на основі крайової умови (2) з урахуванням властивості інтеграла (6) і має вигляд: $C = I\rho/(4\pi r_0)$.

У підсумку співвідношення для функції розподілу потенціалу електричного поля дискового джерела струму, розташованого в однорідному провідному просторі, запишеться так:

$$U(r, z) = \frac{I\rho}{4\pi r_0} \arcsin \frac{2r_0}{\sqrt{(r-r_0)^2 + z^2} + \sqrt{(r+r_0)^2 + z^2}}. \quad (7)$$

Розв'язуючи аналогічну задачу методом дзеркальних відображень для однорідного півпростору, на глибині h від поверхні якого розташований дисковий витік струму, приходимо до такого результату:

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi r_0} \arcsin \frac{2r_0}{R_1 + R_2} - 0, \quad (8)$$

де $R_1 = \sqrt{(r-r_0)^2 + z^2}$, $R_2 = \sqrt{(r+r_0)^2 + z^2}$.

Відповідно поздовжній (ΔU_x) і поперечний (ΔU_y) вимірювані приймальною лінією MN градієнти будуть мати вигляд:

$$\Delta U_x = \frac{\partial U}{\partial x} MN = -\frac{I\rho}{\pi} MN \cdot \frac{x}{r} \cdot \frac{(r+r_0)R_1 + (r-r_0)R_2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4r_0^2}}, \quad (9)$$

$$\Delta U_y = \frac{\partial U}{\partial y} MN = -\frac{I\rho}{\pi} MN \cdot \frac{y}{r} \cdot \frac{(r+r_0)R_1 + (r-r_0)R_2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4r_0^2}}. \quad (10)$$

Оскільки в подальшому в статті наводяться результати порівняльного аналізу поля дискового джерела з полем точкового джерела, отримані на основі відповідних розрахунків, то наведемо також співвідношення для потенціалу та поздовжнього й поперечного градієнтів поля точкового джерела.

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{r^2 + h^2}}, \quad \Delta U_x = \frac{\partial U}{\partial x} MN = -\frac{I\rho}{2\pi} MN \frac{x}{(r^2 + h^2)^{3/2}},$$

$$\Delta U_y = \frac{\partial U}{\partial y} MN = -\frac{I\rho}{2\pi} MN \frac{y}{(r^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (11)$$

Потенціал електричного поля дискового джерела. На рис. 2, а наведено графіки розподілу нормованих значень потенціалу електричного поля дискового джерела U/U_{0h} вздовж епіцентрального профілю для різних значень відношення радіуса диска r_0 до глибини його розташування h ($0 \leq r_0/h \leq 0,5$), а на рис. 2, б – графіки розбіжності цих нормованих значень потенціалу з такими ж нормованими значеннями потенціалу точкового джерела. За нормувальний параметр узятो потенціал поля точкового джерела в епіцентрі, тобто на відстані h : $U_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h}$. Координати точок профілю прив'язані до точки епіцентра і також представлені в нормованому вигляді x/h .

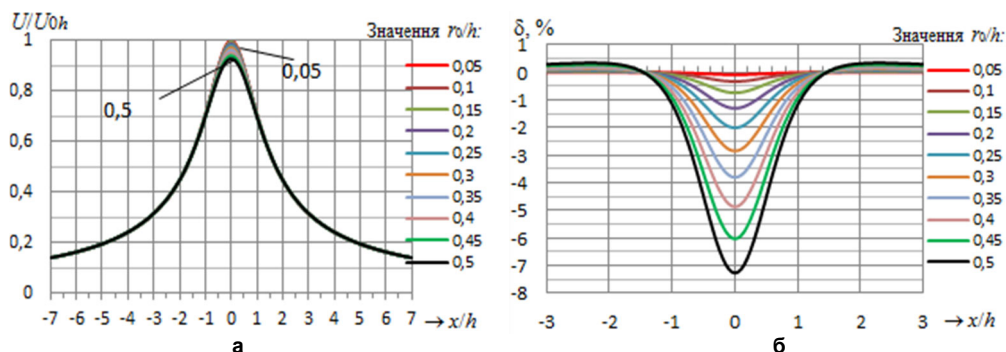


Рис. 2. Графіки розподілу потенціалу електричного поля дискового витoku струму (а) та його розбіжності з потенціалом поля точкового джерела (б) для різних відносних розмірів диска r_0/h

Наведені графіки показують, що потенціальна функція джерела дискового типу в межах зазначених відносних розмірів реальних локальних пошкоджень мало відрізняється від потенціальної функції поля точкового джерела. Так, розрахунки, на основі яких побудовані представлені залежності, свідчать, що на відстанях від епіцентра $x = h$ розбіжність потенціалів полів цих двох типів джерел становить $\delta < 1,16\%$, а на відстанях $x = 1,2h - \delta < 0,5\%$. Максимальна розбіжність характерна для епіцентральної точки і в разі $r_0/h = 0,5$ вона складає $7,3\%$. Зрозуміло, що зі зменшенням розмірів дискового витoku струму зменшується розбіжність з полем точкового джерела. Навіть в епіцентральної точці ця розбіжність не така вже суттєва. Зокрема, при $r_0/h = 0,25$ (у разі $h = 2$ м, $r_0 = 0,5$ м, що є досить суттєвим за розміром локальним витком струму) така розбіжність в епіцентральної точці становить 2% .

Відмічені особливості структури поля джерела дискового типу мають позитивну і негативну сторони. Позитивним є те, що суттєво спрощується визначення глибини h до витoku струму і сили самого струму I . Для цього можна застосувати в певному діапазоні відстаней від екстремуму потенціалу ($r > 1,3h$) алгоритми інтерпретації, застосовувані для поля точкового джерела. Щодо визначення розмірів витoku струму (площі пошкодження), то тут виникають складнощі. Розміри витoku струму найбільш суттєво впливають на структуру поля в околі епіцентральної точки. Зважаючи на відносно несуттєві

зміни аномалії потенціалу в околі епіцентра, практичне визначення розмірів джерела витoku струму проблематичне, хоча принципово можливе. Така інтерпретація зводиться до двох поступових кроків. 1. Визначається глибина h і сила витoku струму I з пошкодження на основі інтерпретації аномалії в інтервалі пікетів $r > 1,3h$, де можливе застосування відносно простих алгоритмів інтерпретації полів точкових джерел. 2. Розміри джерела витoku струму визначаються шляхом чисельного розв'язання трансцендентного рівняння

$$U(r)/U_{0h} = 2 \frac{h}{r_0} \arcsin \frac{2r_0/h}{\sqrt{1+(r/h-r_0/h)^2} + \sqrt{1+(r/h+r_0/h)^2}}, \quad (12)$$

де $U(r)$ – вимірний потенціал у точці, розташований в околі епіцентра на відстані r від нього; $U_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h}$. Для визначення r_0/h можна також скористатися номограмою, представленою на рис. 3. Значення r_0/h відповідає числовому коду кривої, на яку потрапляє точка, абсциса якої дорівнює r/h , а ордината – $U(r)/U_{0h}$.

Принадібно зауважити, що завдання визначення розміру пошкодження досить тонка, вимагає ультрадетальних досліджень по точному визначенню епіцентра аномалії, а також в його околі, бажано на відстанях $r = (0,2 \div 0,6)h$, що не завжди на практиці може бути реалізовано. На більших відстанях завдання може мати лише оціночний характер, оскільки знижується ступінь його коректності й однозначності, а також роздільна здатність номограми.

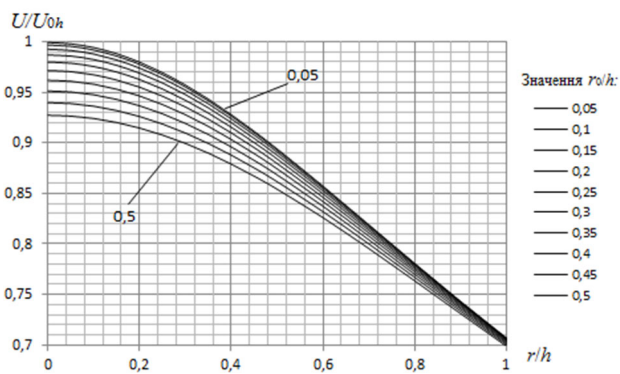


Рис. 3. Номограма для визначення відносних розмірів джерел витoku струму дискового типу

Поздовжній градієнт. На рис. 4, а наведені графіки розподілу нормованих значень поздовжнього градієнта електричного поля дискового джерела E_x/E_{0h} вздовж епіцентрального профілю для різних значень відношення радіуса диска r_0 до глибини його розташування h ($0 \leq r_0/h \leq 0,5$), а на рис. 4, б – графіки розбіжності цих нормованих значень поздовжнього градієнта з такими ж нормованими значеннями поздовжнього градієнта точкового джерела. За нормувальний параметр прийнята поздовжня напруженість поля точкового джерела, розташованого на поверхні півпростору з питомим опором ρ , на відстані h від нього: $E_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h^2}$.

Відповідні розрахунки, відображені графічно на рис. 4, свідчать про те, що цей параметр є більш чутливим до зміни розмірів дискового джерела порівняно з потенціальною функцією. Те, що в околі точки перетину графіком нульової лінії наявні відносно суттєві розбіжності з поздовжнім градієнтом поля точкового джерела є зрозумілим фактом – це пов'язано з малими амплітудними значеннями даної характеристики поля в околі "нуля".

В околі екстремумів порівняно з потенціалом поля поздовжній градієнт є більш чутливим до зміни розмірів диска. Для прикладу, максимальна розбіжність потенціалів електричних полів дискового і точкового джерел у разі $r_0/h = 0,3$ становить $2,8\%$, а при $r_0/h = 0,25$ – 2% , то

на відносному віддаленні від епіцентра $r/h \approx 0,8$, який наближений до координат екстремумів поздовжнього градієнта, розбіжності для цього параметра поля становить значення відповідно $5,6\%$ і 4% , тобто у два рази розбіжність поздовжніх градієнтів, яка пов'язана з розмірами джерел дискового типу, вища порівняно з потенціальною характеристикою поля. Отже, і можливість визначення розмірів джерела поля за результатом аналізу поздовжнього градієнта є більш перспективною.

Можливість визначення розмірів джерела дискового типу може бути реалізована на основі амплітудного аналізу екстремальних значень поздовжнього градієнта, або координат (відстаней) екстремумів відносно точки епіцентра. Рис. 5 свідчить, що в околі екстремумів наявна залежність як амплітуди екстремуму поздовжнього градієнта, так і його просторової координати, від відносних розмірів радіуса джерела r_0/h . У результаті виконаного чисельного аналізу, результати якого представлені в табл. 1, та на рис. 6, встановлено практично аналітичні залежності координат екстремальних точок поздовжнього градієнта $r_{\max}/h$ і його екстремальних відносних значень $e_{\max} = (E_x/E_{0h})_{\max}$ з відносним радіусом r_0/h (рис. 6):

$$r_{\max}/h = 0,58012(r_0/h)^2 + 0,0308(r_0/h) + 0,7086; \quad R^2 = 0,9996; \quad (13)$$

$$e_{\max} = 0,21(r_0/h)^3 - 0,3583(r_0/h)^2 + 0,0063(r_0/h) + 0,3848 \quad R^2_{\max} = 1. \quad (14)$$

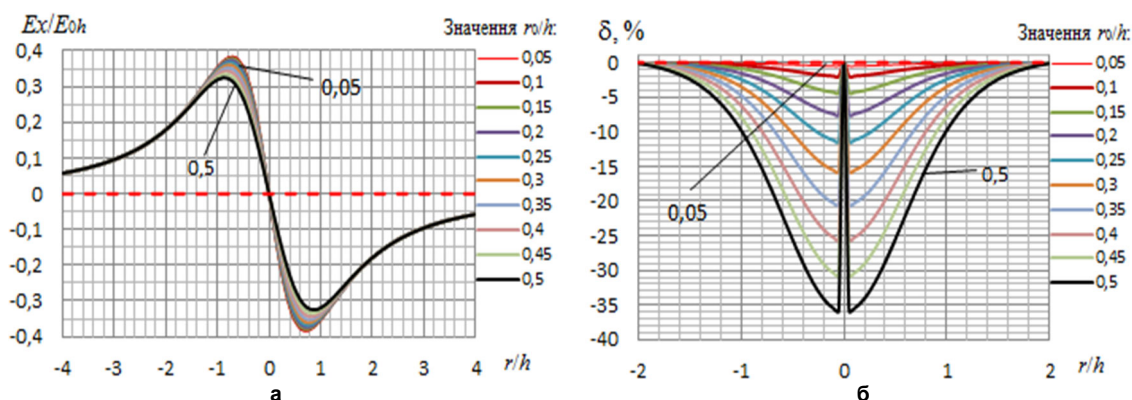


Рис. 4. Графіки поздовжнього градієнта електричного поля дискового витoku струму (а) та його розбіжності з поздовжнім градієнтом поля точкового джерела (б) для різних відносних розмірів диска r_0/h

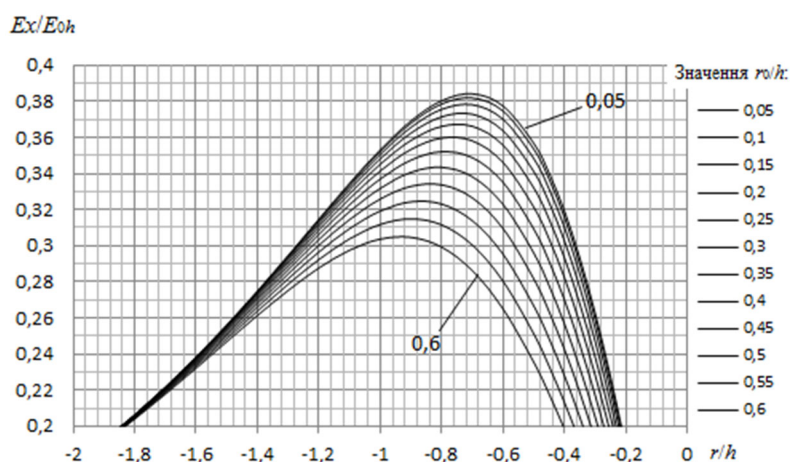


Рис. 5. Графіки поздовжнього градієнта електричного поля дискового витoku струму в околі екстремуму для різних значень радіуса джерела

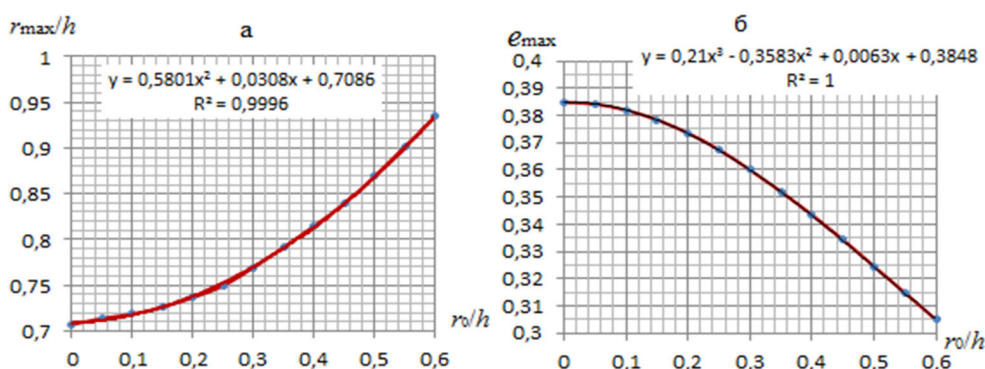


Рис. 6. Графіки залежностей координат екстремумів поздовжнього градієнта електричного поля (а) та його відносних екстремальних значень (б) від відносних розмірів r_0/h дискового джерела

Таблиця 1

Залежність координат екстремумів поздовжнього градієнта електричного поля та його відносних екстремальних значень від відносних розмірів дискового джерела

№	r_0/h	$r_{\max}/h$	$(E_x/E_{0h})_{\max}$
1	0.00	0.3849002	0.3849002
2	0.05	0.3842165	0.3842165
3	0.10	0.3820221	0.3820221
4	0.15	0.3784298	0.3784298
5	0.20	0.3735304	0.3735304
6	0.25	0.3674396	0.3674396
7	0.30	0.3600118	0.3600118
8	0.35	0.3520989	0.3520989
9	0.40	0.3435011	0.3435011
10	0.45	0.3343500	0.3343500
11	0.50	0.3245891	0.3245891
12	0.55	0.3148649	0.3148649
13	0.60	0.3050178	0.3050178

Інтерпретація аномалії поздовжнього градієнта для визначення розмірів джерела полягає в такому: 1. За результатом детальної зйомки потенціалу електричного поля і його поздовжнього градієнта визначається точка епіцентра джерела. 2. За результатом інтерпретації графіка потенціалу визначають глибину h і силу витоку струму I (безперечно за відомого питомого опору ρ середовища, який визначається за даними профілювання чи зондування). 3. За координатами екстремумів поздовжнього градієнта визначають відносний розмір джерела

$$|E_{x,max}| = \frac{I\rho}{\pi h^2} \cdot \frac{(r_{max}/h + r_0/h)^2 R_1 + (r_{max}/h - r_0/h)^2 R_2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4(r_0/h)^2}}, \quad (15)$$

де $R_1 = \sqrt{1 + (r_{max}/h - r_0/h)^2}$, $R_2 = \sqrt{1 + (r_{max}/h + r_0/h)^2}$, r_{max} – відстань від епіцентра джерела до екстремуму.

Звідси струм визначається за формулою

$$I = \pi h^2 \frac{|E_{x,max}|}{\rho} \left\{ \left[\frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4(r_0/h)^2}}{(\sqrt{1 + (r_{max}/h + r_0/h)^2} R_1 + (\sqrt{1 + (r_{max}/h - r_0/h)^2} R_2))} \right] \right\}. \quad (16)$$

Поперечний градієнт. Поперечний градієнт вимірюється вздовж профілю, паралельному радіальному профілю, що перетинає епіцентр джерела. При цьому відстані у цього профілю від епіцентрального можуть бути різними.

На рис. 7 і 8 наведено графіки розподілу нормованих значень поперечного градієнта електричного поля дискового джерела $e_y = E_y/E_{0h}$ та їхніх розбіжностей з відповідною характеристикою поля точкового джерела вздовж двох профілів, паралельних епіцентральному, для різних значень відносного розміру радіуса диска r_0/h ($0 \leq r_0/h \leq 0,5$). Профілі, уздовж яких розраховані графіки поперечного градієнта, розташовані на різних відносних відстанях від епіцентрального профілю, а саме: $y/h=1$

r_0/h , використовуючи кореляційний зв'язок (2) або номограму на рис. 6, а. Визначити r_0/h можна також за амплітудними значеннями екстремумів (хоча це менш надійно). Для цього необхідно виконати їхнє нормування по $E_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h^2}$, після чого скористатися кореляційним зв'язком (3) або номограмою на рис. 6, б.

За амплітудними значеннями екстремумів поздовжнього градієнта можна також проконтролювати визначення сили струму витоку I , виходячи з рівняння

$$E_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h^2}.$$

(рис. 7) і $y/h=0,5$ (рис. 8). За нормувальний параметр, як і в разі з поздовжнім градієнтом, узятя напруженість поля точкового джерела, розташованого на поверхні півпростору з питомим опором ρ , на відстані h :

Розрахунки та їхня візуалізація на зазначених рисунках свідчать, що максимальна розбіжність поперечних градієнтів електричних полів порівнюваних джерел, так само як і потенціалів, спостерігається тоді, коли відстань точки вимірювання поперечного градієнта до епіцентра джерела мінімальна, тобто в системі координат з початком в епіцентрі це відповідає нульовій координаті x ($x=0$).

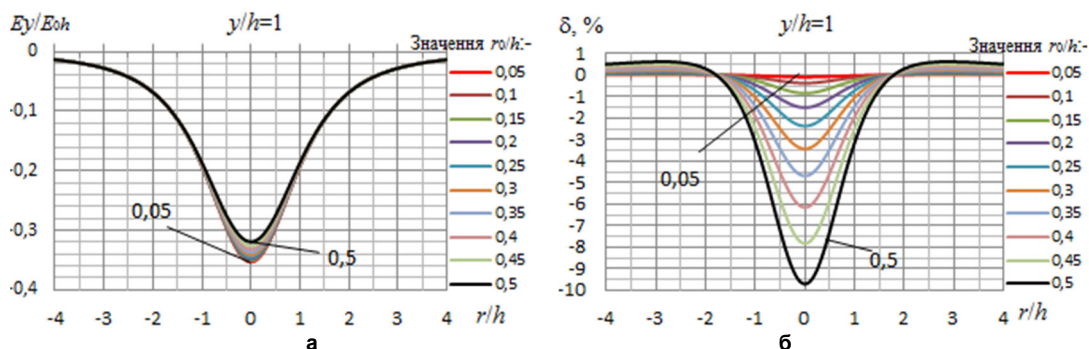


Рис. 7. Графіки поперечного градієнта електричного поля дискового витоку струму (а) та його розбіжності з поперечним градієнтом поля точкового джерела (б) для різних відносних розмірів диска r_0/h (поздовжній профіль $y/h=1$)

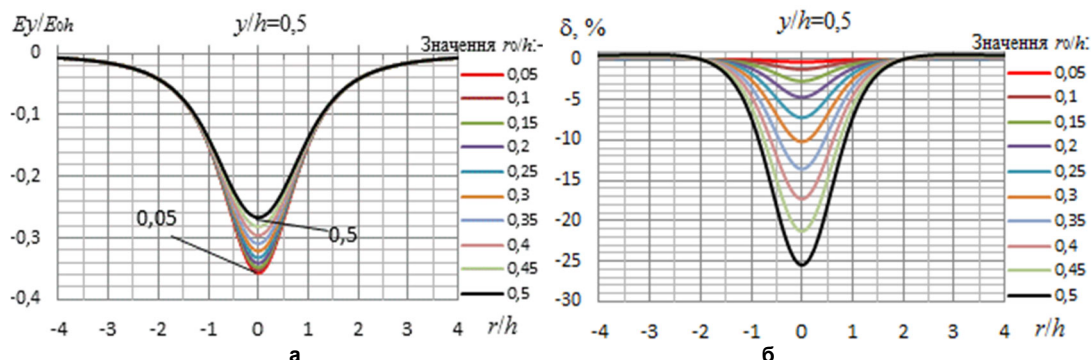


Рис. 8. Графіки поперечного градієнта електричного поля дискового витоку струму (а) та його розбіжності з поперечним градієнтом поля точкового джерела (б) для різних відносних розмірів диска r_0/h (поздовжній профіль $y/h=0,5$)

Розбіжність, а отже, вплив розмірів дискового джерела на поперечний градієнт зростає зі зменшенням відстані профілю (фактично розмірів вимірювальної лінії MN) від поздовжнього епіцентрального, що чітко засвідчують указані рисунки. Так, у разі $y/h=1$ максимальна розбіжність, залежно від розмірів дискового джерела

змінюється в межах від 0 до 10 %, а на профілі $y/h=0,5$ – від 0 до 25 %. Це необхідно враховувати: якщо метою зйомки поперечного градієнта є визначення розмірів джерела, то необхідно вибирати профіль ближчий до поздовжнього епіцентрального. З іншого боку необхідно відмітити, що зі зменшенням відстані до поздовжнього

профілю збільшується поздовжня відстань (модульні значення координати x), на якій при інтерпретації графіків поперечного градієнта можна застосовувати прості алгоритми, властиві для поля точкового джерела. Так, на профілі $y/h=1$ розбіжність $\delta \leq 0,7\%$ за будь-яких розмірів джерела поля в зазначеному інтервалі настає на відстані $x/h = 1,6$, а на профілі $y/h = 0,5$ – на відстані $x/h = 1,8$.

За результатами зйомки поперечного градієнта можна визначити глибину розташування джерела витоку струму h та його силу струму I , аналізуючи аномальні значення поперечного градієнта в інтервалі координати

$x \geq 1,8 h_{\max}$, де можна застосувати алгоритми інтерпретації поля точкового джерела ($h_{\max}$ – максимально можлива глибина). Зокрема, за шириною аномалії на половинному рівні $q_{0,5}$ у разі, коли $q_{0,5}/(2h_{\max}) \geq 1,8 h$, визначається

$$h = \sqrt{0,4256 \cdot q_{0,5}^2 - y^2}. \quad (17)$$

Після цього можна визначити й силу струму I за будь-яким значенням поперечного градієнта в інтервалі піке-тів $|x| > 1,8h$:

$$I = 2\pi \frac{E_x}{\rho} \cdot \frac{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}}{y}. \quad (18)$$

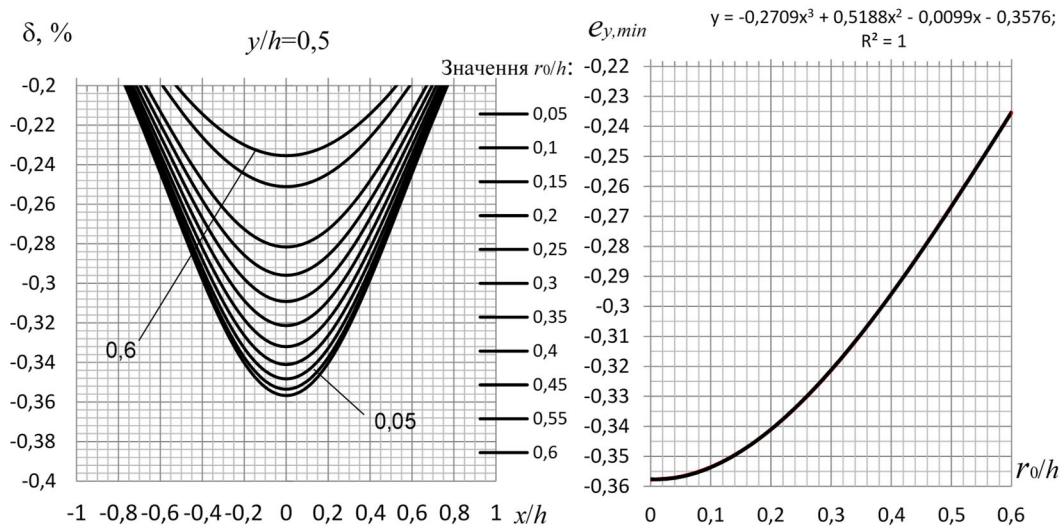


Рис. 9. Графіки нормованих значень поперечного градієнта в околі мінімуму (а) та кореляційного зв'язку нормованих амплітудних мінімумів з відносним розміром джерела r_0/h для профілю $y/h=0,5$

Для визначення радіуса дискового джерела струму необхідно після визначення h установити кореляційний зв'язок між нормованими значеннями мінімуму $e_{y,\min} = E_{y,\min}/E_{oh}$ і відносним розміром джерела r_0/h для конк-

$$e_{\min} = -0,2709(r_0/h)^3 + 0,5188(r_0/h)^2 - 0,0099(r_0/h) - 0,3576 \quad R^2 = 1. \quad (19)$$

Після визначення h і r_0 можна також визначити силу струму I за мінімумом амплітудних значень поперечного градієнта:

$$I = \pi h^2 \frac{|E_{y,\min}|}{\rho} \left\{ \left[\frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4(r_0/h)^2}}{(y_{\min}/h + r_0/h) R_1 + (y_{\min}/h - r_0/h) R_2} \right] \right\}, \quad (20)$$

де

$$R_1 = \sqrt{1 + (y_{\min}/h - r_0/h)^2}, \quad R_2 = \sqrt{1 + (y_{\min}/h + r_0/h)^2}.$$

Висновки. Аналізи результатів виконаних принципових досліджень дозволяють дійти висновків про те, що алгоритми інтерпретації, які ґрунтуються на теоретичній моделі поля точкового пошкодження, можуть бути застосовані для визначення глибин і сили струму витоків з дискових типів пошкоджень. Для графіків розподілу потенціалу поля ці алгоритми можна застосувати на відстанях від екстремуму потенціалу $r > 1,3h$. Для інтерпретації графіків розподілу поперечного градієнта умови застосування моделі поля точкового витоку струму залежать від відносної координати профілю точок вимірювання y/h . Так на профілі $y/h = 1$ розбіжність з полем точкового джерела $\delta \leq 0,7\%$ за будь-яких відносних розмірів джерела поля в інтервалі $r_0/h = 0,05 \div 0,5$ настає на відстані $x/h = 1,6$, а на профілі $y/h = 0,5$ – на відстані $x/h = 1,8$.

Чутливість графіків розподілу поздовжнього і поперечного градієнтів до розмірів дискового джерела вища, ніж графіків потенціалу поля. Визначення розмірів дискового джерела витоку струму можна здійснювати за амплітудними значеннями екстремумів поздовжнього

ретного профілю y/h (приклад графіків нормованого поперечного градієнта в околі мінімуму і графіка кореляційного зв'язку для профілю $y/h=0,5$ наведено на рис. 9. Сам кореляційний зв'язок має вигляд

$$e_{\min} = -0,2709(r_0/h)^3 + 0,5188(r_0/h)^2 - 0,0099(r_0/h) - 0,3576 \quad R^2 = 1. \quad (19)$$

градієнта та їхніми координатами відносно епіцентральної точки. Із цією метою можуть бути використані також екстремальні амплітудні значення поперечного градієнта і попередньо встановлено їхній кореляційний зв'язок з відносними розмірами джерела r_0/h для конкретного значення координати профілю y/h .

Список використаних джерел

- Глоба Р.М., Глоба Я.М., Зінченко І.М., Дзюба О.В. (2017). Геофізичні методи досліджень трас трубопровідних транспортних систем. *Вісник Київського університету. Серія "Геологія"*, 76, 42-46.
- Головцин В. М., Скопиченко М. Ф. (1961). Електрична розвідка корисних копалин. Київ: Видавництво Київського університету.
- Головцын В. Н. (1963). Электроразведка. Киев: Издательство АН УССР.
- Данилов А.В., Глоба, Р.Н., Дзюба О.В., Глоба Я.Н. (2016). Применение электрометрических методов и резонансно-акустического профилирования для изучения влияния геологической среды на трубопроводные транспортные системы. *Вестник ВКГУ им Серикбаева (Казахстан)*, 2, 213-224.
- Калькутин Ю.Г., Лукович В.В. (2012) Розрахунок площі пошкодження протикорозійного покриття відрізка трубопроводу за даними електрометричних вимірювань. *Геофізичний журнал*, 34, 134-139.
- Лукович В.В. (2011). Електричне поле в околі пошкодження протикорозійного покриття трубопроводу. *Геофізичний журнал*, 33, 128-133.
- Прудников А.П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. (1983), Интегралы и ряды. Специальные функции. Москва: Наука.
- Danylov O.V., Hloba R.M., Korneenko S.V., Hloba Y.M. (2017). Geophysical and engineering methods in the study of the Ukrainian pipeline systems. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 5-11.
- Globa Ya.M., Reva M.V., Onyshchuk V.I. (2019). To the question of the detailing of electrical field anomalies caused by current leakage from pipeline damage. "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects", 2019 May 13-16, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902146>

References

- Danylov A.V., Hloba, R.M., Dzyuba O.V., Hloba Y.M. (2016). Primenenie elektrometricheskikh metodov i rezonansno-akusticheskogo profilirovaniya dlya izucheniya vliyaniya geologicheskoy sredy na truboprovodnye transportnye sistemy Vestnik VKGTU im Serikbaeva (Kazakhstan), 2, 213-224. [in Russian].
- Danylov O.V., Hloba R.M., Korneenko S.V., Hloba Y.M. (2017). Geophysical and engineering methods in the study of the Ukrainian pipeline systems. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 5-11.
- Globa Ya.M., Reva M.V., Onyshchuk V.I. (2019). To the question of the detailing of electrical field anomalies caused by current leakage from pipeline damage. "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects", 2019 May 13-16, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902146>
- Hloba R. M., Zinchenko I. M., Hloba Y. M., Dziuba O. V. (2017). Application of geophysical methods for pipeline transport systems. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 76, 42-46 [in Ukrainian].

- Holovtsyn V. M., Skopychenko M. F. (1961). *Elektrychna rozvidka korysnykh kopalyn*. Kyiv: Kyiv University Publishing (in Ukrainian).
- Holovtsyn V. M. (1963). *Elektrozvidka*. Kyiv: Publishing the USSR Academy of Sciences (in Russian).
- Kal'kutin Y.G., Lukovich V.V. (2012) Rozrahunok ploshchi poshkodzhenn' protikorozijnogo pokryttya vidrizka truboprovodu za danimi elektrometrichnih vimiryuvan'. *Geofizichnij zhurnal*, 34, 134-139 [in Ukrainian].
- Lukovich V.V. (2011). Elektrichne pole v okoli poshkodzhennya protikorozijnogo pokryvu truboprovodu. *Geofizichnij zhurnal*, 33, 128-133 [in Ukrainian].
- Prudnikov A.P., Brychkov Y. A., Marichev O. I. (1983). *Integraly i ryady. Special'nye funktsii*. Moskva: Nauka. [in Russian].

Надійшла до редколегії 12.08.2020

Y. Hloba^{1,3}, PhD student, deputy chief geophysicist,
E-mail: globa_yaroslav@ukr.net;
R. Hloba^{2,3}, PhD student, data processing geophysicist
E-mail: hloba_roman@ukr.net;
M. Reva³, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
S. Vyzhva³, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;

¹Limited liability company Enterprise LTD
54, Obolon'sky Prospect, office A, Kyiv, 04214, Ukraine

²Limited liability company Vikoil LTD
7, Kudryavsky Uzviz str., office 211, Kyiv, 04053, Ukraine

³Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

INTERPRETATION POSSIBILITIES OF DISC TYPE SOURCES ELECTRIC FIELDS

As a result of aging of the protective insulation layer of underground pipelines, which occurs under the influence of external factors, in the insulating protective layer can form places where the insulation is damaged that cause a leakage of electric current under the protective potential of the pipe. These processes lead to a decrease in the protective potential of underground pipelines, and thus to a deterioration in the protection of underground utility system. Such damage locations are recorded by surveying the distribution of the electric potential "soil-pipe" (U_{sp}) along the pipeline route by the remote electrode and measuring the "transverse and longitudinal gradients" of the electric field. Since the places of electric current leakage are sources of electric fields, it is important to know the features of these fields in order to assess the degree and extent of damage. From a fundamental point of view, this question comes down to solving the inverse problem of electrometry for fields created by different structure sources. In the case of detailing anomalies, it is desirable to obtain electrometric survey data with an accuracy that allows to apply for their quantitative interpretation methods that base on analytical relationships for anomalies of these parameters. In this paper there is an analysis of the possibilities of using methods which is appropriate for fields created by point sources to interpret the anomalous field caused by a source of leakage current of the disk type damage.

Keywords: point source, disk type source, potential, current leakage strength.

Я. Глоба^{1,3}, асп., зам. главного геофизика
E-mail: globa_yaroslav@ukr.net;
Р. Глоба^{2,3}, асп., геофизик по обработке данных,
E-mail: hloba_roman@ukr.net;
Н. Рева³, канд. физ.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
С. Вижва³, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;

¹Общество с ограниченной ответственностью "Энтерпрайз ЛТД"
пр. Оболонский, 54, оф. буква А, г. Киев, 04214, Украина

²Общество с ограниченной ответственностью "Викоил ЛТД"
ул. Кудрявский спуск, 7, оф. 211, г. Киев, 04053, Украина

³Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ИСТОЧНИКОВ ДИСКОВОГО ТИПА

В результате старения слоя защитной изоляции подземных трубопроводов, которое происходит под действием внешних факторов, в изоляционном защитном слое могут образовываться места, где изоляция нарушается настолько, что происходит утечка электрического тока под действием защитного потенциала трубы. Эти процессы приводят к уменьшению защитного потенциала подземных трубопроводов, а следовательно, к ухудшению защищенности подземных коммуникаций. Такие места повреждений фиксируются съемкой распределения электрического потенциала "труба-земля" ($U_{мз}$) вдоль трассы трубопровода способом выносного электрода и измерениями "поперечного и продольного градиентов" электрического поля. Поскольку места утечки электрического тока являются источниками электрических полей, то важно знать особенности этих полей для оценки степени и размеров повреждений. С принципиальной точки зрения этот вопрос сводится к решению обратной задачи электрометрии для полей, создаваемых источниками различной структуры. В случае детализации аномалий данные электрометрическое съемки желательно получать с точностью, которая позволяет применять для их количественной интерпретации способы, основанные на аналитических соотношениях для аномалий этих параметров. В данной работе выполнен анализ возможностей использования для интерпретации аномального поля, вызванного источником утечки тока с повреждения дискового типа, способов, применяемых для полей, создаваемых точечными источниками.

Ключевые слова: точечный источник, источник дискового типа, потенциал, сила утечки тока.

УДК 550.834

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.05>

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.kiev.ua,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
І. Соловійов, ген. директор,
E-mail: i.solovyov@geounit.com.ua,
ТОВ "ГЕОЮНІТ", пр. С. Бандери, 9, м. Київ, 04073, Україна;
І. Михалевич, асп., заст. головного геолога,
E-mail: i.mykhalevych@kub-gas.com.ua,
ТОВ "КУБ-ГАЗ", вул. Рилєєва, 10а, м. Київ, 04073, Україна;
В. Круглик, пров. геолог,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com,
Г. Лісний, д-р геол. наук, доц.,
E-mail: g.lisny@geounit.com.ua,
ТОВ "ГЕОЮНІТ", пр. С. Бандери, 9, м. Київ, 04073, Україна

ВИКОРИСТАННЯ КІЛЬКІСНИХ ДАНИХ 3D СЕЙСМОРОЗВІДКИ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПАСТОК ВУГЛЕВОДНІВ У МЕЖАХ ПІВНІЧНОГО БОРТУ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

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

На основі результатів численних сейсмічних досліджень, що проведені на площах і родовищах північного борту Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), визначено доцільну стратегію виявлення пасток вуглеводнів у даному регіоні. При цьому враховано сучасні вимоги до пошуків і розвідки покладів газу та нафти. Вони полягають у визначенні імовірних зон скопчення вуглеводнів на основі аналізу структурно-тектонічної моделі. Водночас необхідним елементом розв'язання такого завдання також є використання прямих індикаторів вуглеводнів для прогнозування пасток структурного, літологічного або комбінованого типу.

Показано, що ефективним підходом до виявлення пасток вуглеводнів у цьому регіоні є атрибутний аналіз з використанням таких сейсмічних атрибутів, як огинаюча сейсмічного сигналу, акустичний імпеданс або відносний акустичний імпеданс. У більшості практично важливих випадків аналіз розподілу значень цих атрибутів виявився достатнім для вирішення геологічних завдань. Водночас наведено приклад вилучення додаткової корисної інформації щодо просторового розподілу пасток вуглеводнів з об'ємних сейсмічних зображень, що отримані за сейсмограмами спільних джерел з обмеженим діапазоном нахилів кутів сейсмічних променів.

Для аналізу розподілу значень сейсмічних атрибутів рекомендовано застосовувати технологію geobody як найбільш ефективну в разі використання даних об'ємної сейсморозвідки. Залежно від комбінації сейсмічних атрибутів, що беруть участь в аналізі, визначаються розподіли різних властивостей гірських порід, зокрема зони підвищеної пористості або зони присутності вуглеводнів. Аналіз з одночасним використанням декількох сейсмічних атрибутів дозволяє безпосередньо виявити насичені вуглеводнями геологічні тіла з підвищеною пористістю тощо.

Наведено приклади виявлення пасток вуглеводнів на площах і родовищах північного борту ДДЗ, які підтверджені бурінням свердловин. Надано рекомендації на буріння свердловин з використанням розподілів значень різних сейсмічних атрибутів. Зроблено узагальнення щодо розподілу перспективних на наявність вуглеводнів ділянок на північному борті Дніпровсько-Донецької западини та наведено співвідношення цього розподілу з виявленими структурними елементами геологічного середовища.

Ключові слова: сейсморозвідка, сейсмічні зображення, пастки вуглеводнів різних типів, сейсмічні атрибути, геологічні тіла, прямі індикатори вуглеводнів.

Вступ. Сучасні підходи до пошуків пасток вуглеводнів у Дніпровсько-Донецькій западині (ДДЗ) передбачають використання даних об'ємної сейсморозвідки як доволі інформативних. Разом із побудовою структурно-тектонічної моделі вивчаються розподіли значень сейсмічних атрибутів, що дозволяють отримувати кількісні характеристики фізичних властивостей гірських порід. У деяких випадках це допомагає досить точно виявляти пастки вуглеводнів будь-якого типу. Для ліцензійних ділянок північного борту ДДЗ значний інтерес становить розвідка літологічних пасток вуглеводнів. Вивченню таких пасток присвячено серію статей, зокрема (Вижва та ін., 2018, 2019), а також доповідей на міжнародних конференціях (Vyzhva et al., 2018, 2019; Стрельцова та ін., 2019). Результати цих робіт показують, що літологічні пастки є досить поширеними в межах північного борту ДДЗ, а їхня розвідка становить практичний інтерес. Виявлення літологічних пасток базується на аналізі значень сейсмічних атрибутів, що мають певний фізичний зміст. Цілковито інформативними для виявлення літологічних пасток є такі сейсмічні атрибути, як акустичний імпеданс, у тому числі й відносний акустичний імпеданс, огинаюча сейсмічного сигналу, миттєва частота. Цікавими також є сейсмічні зображення, що отримані за сейсмограмами з обмеженими діапазонами кутів сейсмічних

променів. Такі зображення використовуються для отримання AVO атрибутів і визначення характеру насичення гірських порід вуглеводнями. Для виявлення літологічних пасток вуглеводнів часто використовується також розподіл значень відношення V_p/V_s , де V_p – швидкість поздовжньої, а V_s – швидкість поперечної хвилі. Ці та деякі інші сейсмічні атрибути ще мають назву прямих індикаторів наявності вуглеводнів. Зрозуміло, що фізичний зміст цих індикаторів не обмежує їхнє застосування для виявлення лише літологічних пасток. Вони з однаковим успіхом застосовуються для виявлення наявності вуглеводнів у пастках будь-якого типу, зокрема структурних. Однак для виявлення неструктурних пасток основним підходом є саме використання прямих індикаторів вуглеводнів.

Технологія виявлення літологічних пасток вуглеводнів у межах північного борту Дніпровсько-Донецької западини. Під час вибору та тестування такої технології автори мали за мету отримання достовірних і водночас стійких рішень. Розв'язання цієї проблеми базується на визначенні доцільного співвідношення між складністю та стійкістю алгоритмів, що застосовуються. Стосовно визначення властивостей літологічних пасток бажання підвищити точність рішень завжди стикається з необхідністю ускладнення технології та використання сейсморозвідувальних даних з підвищеними вимогами

щодо їхньої якості. Однак переважна більшість результатів сейсморозвідувальних зйомок з тих чи інших причин характеризується доволі високим рівнем завад. Зокрема, це типово для сейсмограм, зареєстрованих на північному борті ДДЗ, а також для результатів їхньої обробки, включаючи об'ємні сейсмічні зображення геологічного середовища. І якщо ускладнення технології дає позитивні результати щодо синтетичних сейсморозвідувальних даних, то для реальних даних часто спостерігаються зворотні результати. Вони пов'язані з нестійкістю обчислення сейсмічних атрибутів за сейсмограмами та сейсмічними зображеннями з низьким співвідношенням сигнал/завада. У таких випадках незначні помилки в сейсморозвідувальних даних спричиняють істотні помилки в розподілах значень сейсмічних атрибутів, що використовуються для виявлення та визначення характеристик літологічних пасток вуглеводнів.

Ураховуючи наведені міркування, автори провели низку експериментів і тестів для визначення оптимального набору сейсмічних атрибутів для виявлення літологічних пасток вуглеводнів на північному борті ДДЗ. Важливим атрибутом є огинаюча сейсмічного сигналу *Envelope*, яка обчислюється за такою формулою:

$$Envelope = [f^2(t) + g^2(t)]^{1/2},$$

де $f(t)$ – дійсна частина, $g(t)$ – уявна частина сейсмічної траси.

Атрибут огинаюча сигналу завжди має позитивні значення, які досягають максимального значення амплітуди сейсмічної траси. Він допомагає виділяти так звані яскраві плями на сейсмічних записах, які відповідають, наприклад, купченням газу. Яскраві плями – це термін, що використовується для опису аномальних високоамплітудних зон у сейсміці, які зазвичай інтерпретуються як газовий індикатор в уламкових породах або продуктивних пластах. Отже, яскраві плями можуть бути асоційовані з вуглеводневими пластами та потенційними пастками вуглеводнів. Атрибут також допомагає виділяти зміни в літології, які можуть слабо відображатися на сейсмічних зображеннях.

Цей атрибут є одним із загальних і добре відомих застосувань сейсмічного атрибутного аналізу через пряму кореляцію між змінами в амплітудах сейсмічних хвиль зі змінами фізичних властивостей гірських порід. Атрибут може відображати зміни в літології й насиченні гірських порід флюїдами та газами.

Наступним необхідним атрибутом є відносний акустичний імпеданс. Вихідними даними для його обчислення є сейсмічні траси у вигляді послідовностей коефіцієнтів відбиття (*Taner, 1992*). Для отримання останніх застосовується зворотна згортка або деконволюція з відповідними сейсмічними імпульсами. Для сейсмічної траси у вигляді коефіцієнтів відбиття $f(t)$ має місце таке співвідношення:

$$f(t) = \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho v}{\rho v},$$

де ρ – густина гірських порід; v – швидкість поширення поздовжніх хвиль у гірських породах.

Останній вираз можна переписати у вигляді диференційного рівняння:

$$f(t) = \frac{1}{2} \Delta \ln(\rho v).$$

Рішенням такого диференційного рівняння є вираз такого вигляду:

$$\ln(\rho v) = 2 \int_{t=0}^{t=T} f(t) dt.$$

Розв'язання диференційного рівняння виконується з точністю до константи. Тому наведене рішення носить назву "відносний акустичний імпеданс". Точне рішення

диференційного рівняння вимагає додаткових умов або додаткової інформації. У даному випадку такою інформацією є низькочастотний тренд акустичного імпедансу. Для врахування цього тренду використовується апріорна інформація у вигляді значень акустичного імпедансу у свердловинах.

Слід зазначити, що акустичний імпеданс, як і відносний акустичний імпеданс характеризується стійкою кореляцією з пористістю гірських порід. Це впливає зі зрозумілого фізичного змісту цього атрибуту. Малі значення відносного акустичного імпедансу відповідають малим швидкостям і густині, що характеризує гірську породу з підвищеною пористістю.

Корисним атрибутом є відношення значень поздовжніх і поперечних хвиль v_p/v_s . Для гірських порід, насичених газом, значення швидкостей поздовжніх хвиль будуть меншими порівняно зі значеннями швидкостей у породах, насичених водою. Водночас істотних змін у значеннях швидкостей поперечних хвиль у цьому випадку не відбувається. Таким чином, перевірка аномалій для поздовжніх хвиль, зокрема яскравих плям із залученням даних про швидкості поперечних хвиль, є цілком інформативна (*Tatham and Stoffa, 1976*).

Обчислення об'ємних розподілів сейсмічних атрибутів є частиною технології виявлення літологічних пасток вуглеводнів. Однак не менш важливою її частиною є визначення способу їхнього аналізу. Тривимірною моделю геологічного середовища складається з набору об'ємних комірок, кожна з яких містить значення фізичних параметрів або сейсмічних атрибутів. Основним завданням аналізу такого набору комірок є виявлення так званих геологічних тіл. Такі тіла визначаються як зв'язані групи комірок, що мають певні властивості. З міркувань доцільності подальшого використання геологічних тіл необхідно також визначити мінімальний розмір геологічних тіл, що становлять практичний інтерес.

Візуальний аналіз об'ємних комірок є неефективним через їхню значну кількість і в основному слабку роздільну здатність кольорових палітр. Тому для виявлення геологічних тіл застосовується технологія *geobody*, що впроваджена компанією *Schlumberger*. Основні підходи до використання цієї технології на території ДДЗ розглянуто в роботах (*Вижва та ін., 2019; Vyzhva et al., 2019*).

Приклади виявлення пасток вуглеводнів у межах північного борту Дніпровсько-Донецької западини. Розглянемо ділянку площі досліджень, що має розміри близько 500 км². На рис. 1. показана схема розташування геологічних тіл, що є перспективними на наявність вуглеводнів. У даному випадку кольорова палітра не несе будь-якої інформації про розподіл значень сейсмічних атрибутів. Різні геологічні тіла показані різними кольорами для зручності їхнього візуального сприйняття. Усі геологічні тіла належать до відкладів карбону. Ізолінії на схемі показують виявлені в товщі карбонів відкладів структури, що для традиційної структурної сейсморозвідки вважаються перспективними на наявність вуглеводнів. Різні структури подано різними кольорами.

Аналіз наведеної на рис. 1 схеми показує істотні розбіжності між класичними перспективними структурами та геологічними тілами, визначеними за допомогою прямих індикаторів вуглеводнів. Лише північно-західна частина наведеної ділянки характеризується збігом виділених структур і геологічних тіл, насичених вуглеводнями. Співвідношення між потенційно перспективними структурами та фактичним розташуванням пасток вуглеводнів різних типів, що випливають зі схеми, показаної на рис. 1, є типовими для північного борту ДДЗ. У даному випадку закладання свердловин лише на підставі позитивного структурного фактора призводить до низької

успішності їхнього буріння. Про це свідчать численні негативні результати буріння на цій території. Таким чином, для успішного буріння свердловин на вуглеводні необхідно

використовувати прямі індикатори наявності вуглеводнів як для структурних, так і для неструктурних пасток.

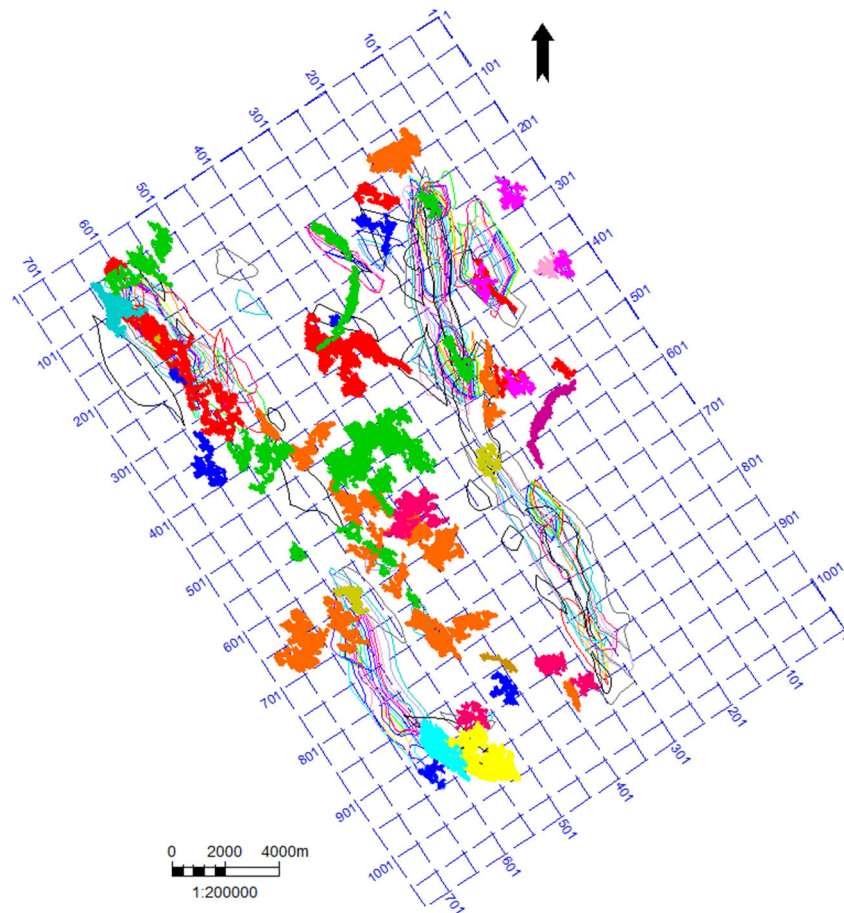


Рис. 1. Схема розташування геологічних тіл і структур, перспективних на наявність вуглеводнів

Розглянемо приклад виявлення газонасиченого геологічного тіла у відкладах продуктивного горизонту М-3 московського ярусу середнього карбону. Для цього звернемося до рис. 2, на якому наведено відповідне геологічне тіло площею 0,5 кв. км², яке є класичною літологічною пасткою вуглеводнів. Ізолінії та кольорова палітра визначають глибини відбиваючого горизонту в товщі відкладів продуктивного горизонту М-3 московського ярусу середнього карбону. Для виявлення цієї пастки було використано технологію geobody. За вихідні дані використано об'ємне сейсмічне зображення, що побудовано за сейсмограмами спільних джерел з обмеженим діапазоном нахилу сейсмічних променів. У цьому прикладі діапазон нахилу сейсмічних променів становить 10–30°. Розріз такого сейсмічного зображення наведено на рис. 3, а його положення в плані показано на рис. 2 лінією, що перетинає літологічну пастку газу. Для виявлення газонасиченого геологічного тіла використано лише один атрибут – огинаючу сейсмічного сигналу. У цьому прикладі інформативності огинаючої сейсмічного сигналу виявилось достатньо для виявлення літологічної пастки газу.

Наявність газу в літологічній пастці підтверджена вертикальною свердловиною, наведеною на рис. 3. Червоними точками показано зони перфорації. Газовий поклад відповідає великим амплітудам сигналів хвиль сейсмічного зображення, що показані блакитним кольором. Інакше кажучи, газовий поклад, показаний на сейсмічному зображенні, є класичною яскравою плямою. Наведений вертикальний розріз містить також додаткову важливу

інформацію. Нижче газового покладу розташована горизонтальна зона підвищених амплітуд сигналів хвиль сейсмічного зображення. Вона має назву "плоска пляма" і визначає контакт між газом і водою.

Для оцінки пористості гірських порід та обчислення запасів газу в літологічній пастці можна використовувати акустичний імпеданс або відносний акустичний імпеданс. Однак у даному випадку визначення пористості та підрахунок запасів газу було зроблено за даними геофізичних досліджень у пробуреній через дану пастку свердловині.

У наступному прикладі для виявлення геологічного тіла, що є пасткою вуглеводнів, використано декілька сейсмічних атрибутів. На рис. 4 показано контури геологічних тіл, що визначені в різні способи.

Геологічне тіло, яке відповідає контуру з меншою площею та наявністю кольорової заливки, отримано шляхом спільного використання двох сейсмічних атрибутів – огинаючу сейсмічного сигналу та відносного акустичного імпедансу. Для виявлення пористого газонасиченого геологічного тіла із запасами газу, достатніми для прибуткової розробки покладу, необхідно визначити доцільний діапазон змін значень огинаючої сейсмічного сигналу та відносного акустичного імпедансу, а також мінімальний об'єм геологічного тіла, необхідний для економічно виправданої розробки покладу. Газонасичені геологічні тіла з підвищеною пористістю характеризуються підвищеними значеннями огинаючої сейсмічного сигналу та водночас пониженими значеннями відносного акустичного імпедансу. Діапазони змін

цих атрибутів визначаються в емпіричний спосіб з використанням свердловинних даних. Щодо мінімального розміру геологічних тіл, які становлять практичний інтерес,

зазначимо, що він визначається з урахуванням оцінки обсягу імовірних запасів газу геологічних тіл та економічних показників розробки відповідних пасток газу.

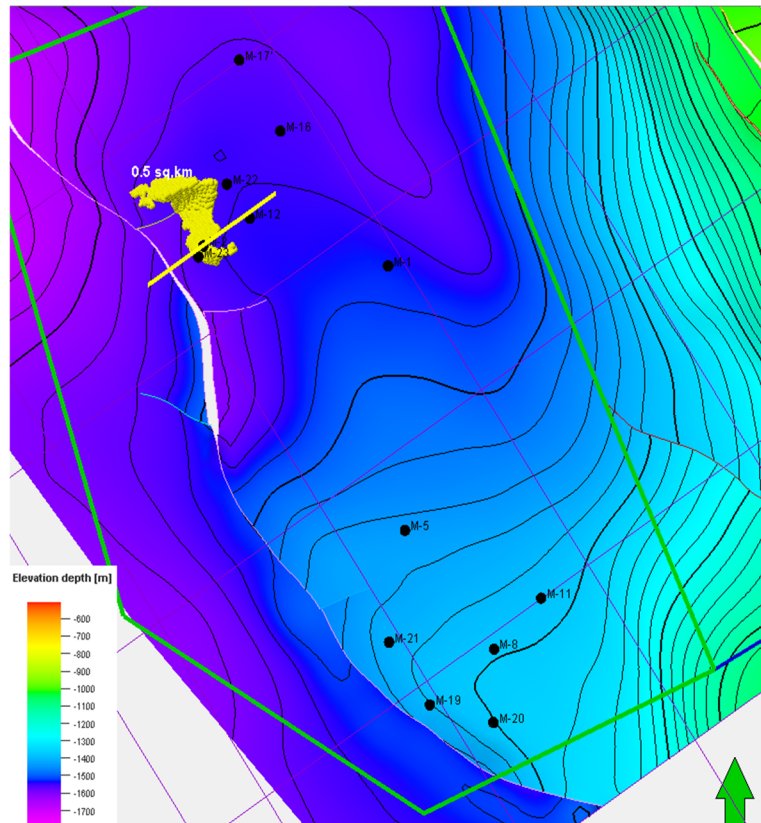


Рис. 2. Газонасичене геологічне тіло у відкладах продуктивного горизонту М-3 московського ярусу середнього карбону

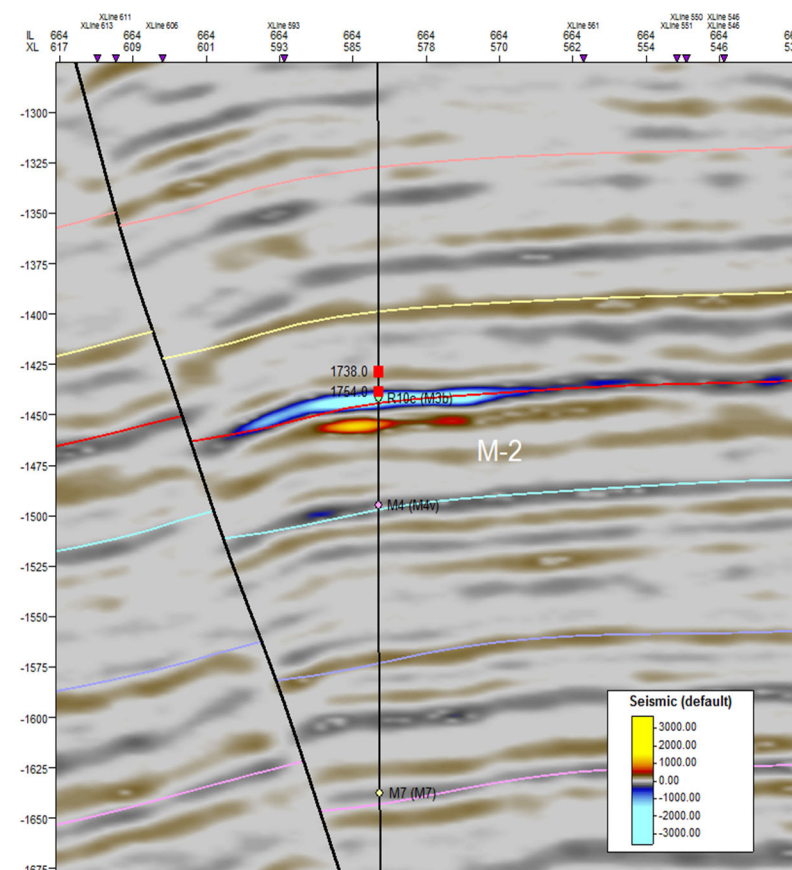


Рис. 3. Вертикальний розріз об'ємного сейсмічного зображення, отриманий за сейсмограмами спільних джерел з обмеженим діапазоном нахилів кутів сейсмічних променів

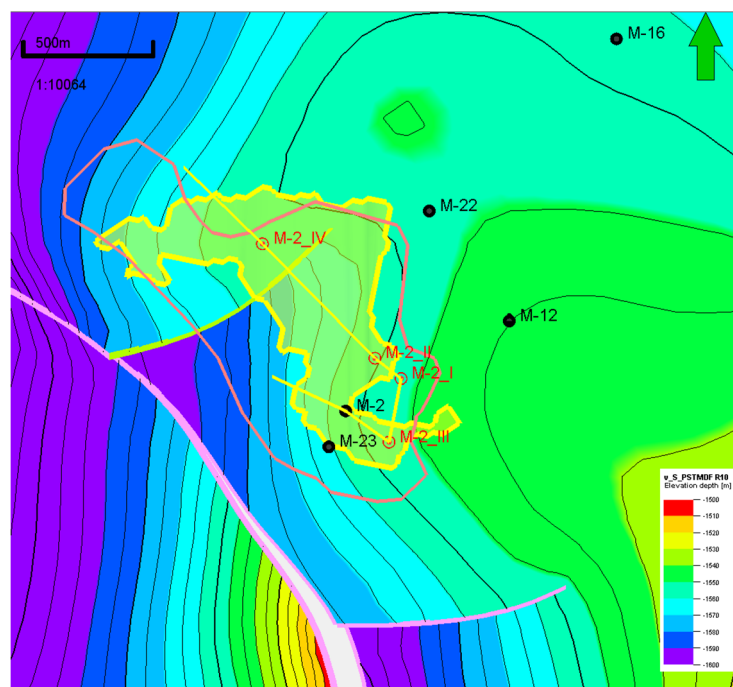


Рис. 4. Контури геологічних тіл, отриманих з використанням різних сейсмічних атрибутів.

Контур меншої площі з кольоровою заливкою відповідає геологічному тілу, отриманому шляхом спільного використання огинаючої сейсмічного сигналу та відносного акустичного імпедансу. Контур більшої площі відповідає геологічному тілу, отриманому з використанням сейсмічного атрибуту v_p/v_s .

Другому варіанту геологічного тіла або імовірної пастки вуглеводнів відповідає контур більшої площі з відсутністю кольорової заливки. Геологічне тіло виявлено з використанням сейсмічного атрибуту v_p/v_s . Необхідний для виявлення газонасичених гірських порід діапазон зміни значень v_p/v_s визначено за свердловинними даними. Значення збігу двох варіантів геологічних тіл у плані становить близько 70 %. У північно-східному напрямку збіг двох варіантів геологічних тіл збільшується, а в південно-західному напрямку – зменшується. Відсутність газу у свердловині М-23 зменшує імовірність наявності газонасиченої гірської породи в південно-західній частині геологічного тіла, визначеного за сейсмічним атрибутом v_p/v_s .

На рис. 5 показано вертикальний розріз об'ємного сейсмічного зображення площі досліджень уздовж ламаної лінії (рис. 4). Розріз проходить через вертикальні свердловини, серед яких свердловина М-2 є пробуреною, а решта проектні. На розрізі кольоровими кульками показано геологічне тіло, отримане з використанням об'ємних розподілів значень огинаючої сейсмічного сигналу та відносного акустичного імпедансу. Вигляд цього геологічного тіла або пастки вуглеводнів у розрізі дає змогу зробити такі висновки. Пастку можна вважати структурною, однак розподіл газу в пастці залежить в основному від літологічного фактора. Це підтверджується відсутністю газу в лівій склепінній частині пастки, показаній на розрізі, та нетиповому розподілі газу в правій склепінній частині.

Конфігурація виявленого геологічного тіла, що є перспективним на наявність природного газу, дозволяє визначити попередні точки для буріння нових свердловин. На рис. 4 свердловини М-2 та М-23 є пробуреними, а свердловини М-2_I, М-2_II, М-2_III та М-2_IV – рекомендовані. Наведені чотири варіанти проектних свердловин були рекомендовані після того, як з технічних причин став неможливим відбір залишкових запасів газу з газонасиченого поклада продуктивного горизонту М-3 московських відкладів середнього карбону через свердловину М-2. Проектні глибини свердловин обмежуються глибиною розкриття даного поклада і становлять близько 1750 м. Проаналізуємо доцільність наведених

рекомендацій на буріння свердловин і визначимо свердловини, які можна вважати оптимальними для подальшої розробки поклада газу.

Перша рекомендована свердловина М-2_I розташована на північному сході від свердловини М-2 і розкриває пастку на 5 м вище, ніж свердловина М-2. Вона потрапляє в контур газонасиченого геологічного тіла, що виділена за допомогою сейсмічного атрибуту v_p/v_s . Однак ця свердловина не потрапляє у контур геологічного тіла, що виявлено за об'ємним розподілом значень огинаючої сейсмічного сигналу та відносного акустичного імпедансу.

Друга рекомендована свердловина М-2_II розташована поряд із свердловиною М-2_I, однак потрапляє в контури обох геологічних тіл. Очікувана глибина розкриття покрівлі продуктивного горизонту М-3 московського ярусу середнього карбону розташована на 2 м вище, ніж у свердловині М-2.

Наступну свердловину М-2_III рекомендовано пробурити на південний схід від свердловини М-2. Вона розкриває продуктивний горизонт М-3 московських відкладів середнього карбону на тій самій позначці, що й рекомендована свердловина М-2_I. Свердловина М-2_III потрапляє в контури обох геологічних тіл.

Свердловина М-2_IV, що рекомендується для розкриття газонасиченого геологічного тіла в межах продуктивного горизонту М-3 московських відкладів середнього карбону, розташована у західному піднятому нерозбуреному блоці на північному заході від свердловини М-2. Вона також потрапляє в контури обох геологічних тіл.

Аналіз різних варіантів розробки поклада з використанням наведених рекомендованих свердловин з урахуванням оцінки залишкових запасів пастки та економічних показників розробки дозволив зробити такі висновки. Оптимальним є буріння похилого стовбуру свердловини М-2 з точками розкриття газонасиченого геологічного тіла в продуктивному горизонті М-3 у рекомендованих свердловинах М-2_II та М-2_III. Крім того, оптимальним також є буріння нової вертикальної свердловини М-2_IV у західному блоці газонасиченого поклада.

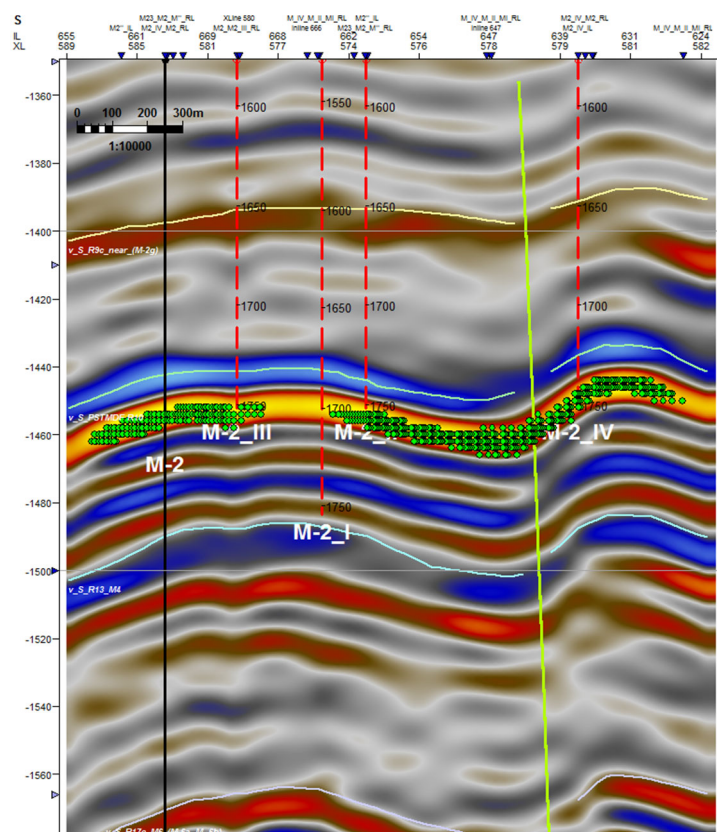


Рис. 5. Вертикальний розріз об'ємного сейсмічного зображення уздовж ламаної лінії, що проходить через пробурені та проектні свердловини. Кольоровими кульками показано геологічне тіло, отримане з використанням атрибутів огинаючої сейсмічного сигналу та відносного акустичного імпедансу

Висновки. У роботі розглянуто сучасний підхід до пошуків і розвідки пасток газу і нафти в межах північного борту Дніпровсько-Донецької западини. Результати робіт з об'ємної сейсморозвідки, виконані в даному регіоні, свідчать про зниження ефективності застосування традиційних технологій прогнозування пасток вуглеводнів, які базуються на аналізі структурно-тектонічних моделей. У ряді випадків використання лише структурного фактора не дає позитивних результатів. Це певною мірою пов'язано з відсутністю великих структурних пасток. Відповідно до цього розробка таких покладів може не досягати бажаної рентабельності. З наведеної схеми розташування геологічних тіл і структур, перспективних на наявність вуглеводнів, випливає таке. Значна частина структур, які умовно вважаються перспективними, характеризується низькою імовірністю наявності вуглеводнів. Практика буріння свердловин на таких структурах підтверджує цей висновок.

Підвищення ефективності пошуків, розвідки та розробки покладів газу і нафти в даному регіоні безпосередньо пов'язано з використанням прямих індикаторів вуглеводнів. У статті запропоновано концепцію доцільного використання сейсмічних атрибутів для розв'язання даного геологічного завдання. Проаналізована ефективність застосування різних наборів сейсмічних атрибутів. Критерієм визначення оптимального набору атрибутів і технологій їхнього використання є доцільне співвідношення між складністю та стійкістю алгоритмів, що застосовуються. Визначено найбільш доцільний спосіб інтерактивного аналізу об'ємних розподілів значень сейсмічних атрибутів, що базується на виявленні геологічних тіл з певними фізичними властивостями.

Наведено приклади виявлення пасток вуглеводнів і визначення їхніх фізичних властивостей, що підтверджені бурінням свердловин. Виконано оцінку розбіжностей пасток вуглеводнів, виявлених за допомогою різних наборів сейсмічних атрибутів.

Список використаних джерел

- Вижва, С., Соловйов, І., Круглик, В., Лісний, Г. (2018). Прогнозування зон підвищеної пористості у глинистих породах Сходу України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1 (80), 28–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.80.04>.
- Вижва, С., Соловйов, І., Круглик, В., Лісний, Г. (2019). Використання технології інтерактивної класифікації геологічних тіл для прогнозування покладів газу на сході України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1 (84), 70–77. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.84.10>.
- Стрельцова, І.О., Чуприна, А.М., Круглик, В.М. (2019). Визначення нафтогазоперспективності відкладів нижньої Пермі в межах Південно-Хрещитищенської площі Дніпровсько-Донецької западини із застосуванням сейсмічного атрибутивного аналізу. *Матеріали VIII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції: Ідеї та новачі в системі наук про Землю*, 10–12 квітня 2019 р., Київ.
- Taner, M. (1992). *Attributes Revisited*. Rock Solid Images, Houston, Texas.
- Tatham, R.H., Stoffa, P.L. (1976). VP/VS – A potential hydrocarbon indicator. *Geophysics*, 41, 5, 837–849. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440668>.
- Vyzhva, S.A., Solovyov, I.V., Kruhlyk, V.M., Lisny, G.D. (2019). Application of two-parameter classification of seismic attributes for prediction of hydrocarbon deposits in the Dnieper-Donetsk depression. *XIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 12–15 November 2019, Kyiv, Ukraine.
- Vyzhva, S.A., Solovyov, I.V., Kruhlyk, V.M., Lisny, G.D. (2018). Modern approaches of gas deposits forecasting in Eastern Ukraine. *XII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13–16 November 2018, Kyiv, Ukraine.

References

- Streltsova, I., Chupryna, A., Kruhlyk, V. (2019). Prospects of oil and gas in the lower Permian sediments in the Pivdenno-Khrestyshchenska area of the Dnieper-Donets basin with the use of seismic attributes. *Ideas and innovations in geosciences. Proceedings of the VIII Ukrainian young scientific conference*, 10–12 April 2019, Kyiv.
- Taner, M. (1992). *Attributes Revisited*. Rock Solid Images, Houston, Texas.
- Tatham, R.H., Stoffa, P.L. (1976). VP/VS – A potential hydrocarbon indicator. *Geophysics*, 41, 5, 837–849. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440668>.
- Vyzhva, S.A., Solovyov, I.V., Kruhlyk, V.M., Lisny, G.D. (2018). Prediction of high porosity zones in clay rocks at the Eastern Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80, 28–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.80.04> [in Ukrainian].
- Vyzhva, S.A., Solovyov, I.V., Kruhlyk, V.M., Lisny, G.D. (2019). Application of two-parameter classification of seismic attributes for prediction of hydrocarbon deposits in the Dnieper-Donetsk depression. *XIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 12–15 November 2019, Kyiv, Ukraine.

Vyzhva, S.A., Solovyov, I.V., Kruhlyk, V.M., Lisny, G.D. (2019). Use of the technology of interactive classification of geological bodies for gas deposits prediction in eastern Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 84, 70–77. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.84.10> [in Ukrainian].

Vyzhva, S.A., Solovyov, I.V., Kruhlyk, V.M., Lisny, G.D. (2018). Modern approaches of gas deposits forecasting in Eastern Ukraine. *XII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13–16 November 2018, Kyiv, Ukraine.

Надійшла до редакції 18.08.2020

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhvas@gmail.com,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90, Vasylkivska Str., Kyiv, Ukraine, 03022;
I. Solovyov, Director General,
E-mail: i.solovyov@geounit.com.ua,
Geounit LLC, 9 S. Bandery Ave., Kyiv, 04073, Ukraine;
I. Mihalevich, PhD student, Deputy Chief Geologist,
E-mail: i.mykhalevych@kub-gas.com.ua,
CUB-GAZ LLC, 10a Rileeva Str., Kyiv, 04073, Ukraine;
V. Kruhlyk, Senior Geologist,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com;
G. Lisny, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof., Advisor Director General,
E-mail: g.lisny@geounit.com.ua,
Geounit LLC, 9 S. Bandery Ave., Kyiv, 04073, Ukraine

USE OF QUANTITATIVE DATA OF 3D SEISMIC EXPLORATION FOR DETECTION OF TRAPS OF HYDROCARBONS WITH IN THE NORTH SIDE OF THE DNIEPER-DONETSK DEPRESSION

Based on the results of numerous seismic surveys conducted on the areas and deposits of the northern side of the Dnieper-Donetsk depression, an appropriate strategy for detecting hydrocarbon traps in this region has been determined. This takes into account modern requirements for exploration and prospecting of gas and oil deposits. They consist in determining the probable zones of accumulation of hydrocarbons based on the analysis of the structural-tectonic model. At the same time, the use of direct hydrocarbon indicators to predict structural, lithological or combined traps is also a necessary element in solving this problem.

It has been shown that an effective approach to detecting hydrocarbon traps in this region is attribute analysis using seismic attributes such as seismic signal envelope, acoustic impedance or relative acoustic impedance. In most practically important cases, the analysis of the distribution of values of these attributes was sufficient to solve geological problems. At the same time, an example of extracting additional useful information on the spatial distribution of hydrocarbon traps from volumetric seismic images obtained from seismograms of common sources with a limited range of seismic angle inclinations is given.

To analyze the distributions of seismic attribute values it is recommended to use geobody technology as the most effective one when using volumetric seismic data. Depending on the combination of seismic attributes involved in the analysis, the distributions of different properties of rocks are determined, in particular the zone of increased porosity or the presence of hydrocarbons. Analysis with the simultaneous use of several seismic attributes allows to directly identify hydrocarbon-rich geological bodies with high porosity and the like.

The paper presents examples of detection of hydrocarbon traps in the areas and deposits of the northern side of the Dnieper-Donetsk depression, which are confirmed by drilled wells. An example of providing recommendations for wells drilling using the distributions of values of different seismic attributes is given.

Generalizations are made on the distribution of promising areas for the presence of hydrocarbons on the northern side of the Dnieper-Donetsk depression and the ratio of this distribution with the identified structural elements of the geological environment.

Keywords: seismic exploration, seismic images, hydrocarbon traps of different types, seismic attributes, geological bodies, direct hydrocarbon indicators.

С. Выжва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vyzhvas@gmail.com,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
И. Соловьев, ген. директор,
E-mail: i.solovyov@geounit.com.ua,
ООО "ГЕОЮНИТ", пр. С. Бандеры, 9, г. Киев, 04073, Украина;
И. Михалевич, асп., зам. главного геолога,
E-mail: i.mykhalevych@kub-gas.com.ua,
ООО "КУБ-ГАЗ", ул. Рылеева, 10а, г. Киев, 04073, Украина;
В. Круглик, вед. геолог,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com;
Г. Лесной, д-р геол. наук, доц., советник ген. директора,
E-mail: g.lisny@geounit.com.ua,
ООО "ГЕОЮНИТ", пр. С. Бандеры, 9, г. Киев, 04073, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ДАННЫХ 3D СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ПОИСКА ЛОВУШЕК УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРЕДЕЛАХ СЕВЕРНОГО БОРТА ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ

На основе результатов многочисленных сейсмических исследований, проведенных на площадях и месторождениях северного борта Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ), определена целесообразная стратегия выявления ловушек углеводородов в данном регионе. При этом учтены современные требования к поискам и разведке залежей газа и нефти. Они заключаются в определении вероятных зон скопления углеводородов на основе анализа структурно-тектонической модели. В то же время необходимым элементом решения такой задачи является также использование прямых индикаторов углеводородов для прогнозирования ловушек структурного, литологического или комбинированного типа.

Показано, что эффективным подходом к поискам ловушек углеводородов в данном регионе является атрибутный анализ с использованием таких сейсмических атрибутов, как огибающая сейсмического сигнала, акустический импеданс или относительный акустический импеданс. В большинстве практически важных случаев анализ распределения значений этих атрибутов оказался достаточным для решения геологических задач. В то же время приведен пример извлечения дополнительной полезной информации о пространственном распределении ловушек углеводородов из объемных сейсмических изображений, полученных с использованием сейсмограмм общих источников с ограниченным диапазоном наклонов углов сейсмических лучей.

Для анализа распределений значений сейсмических атрибутов рекомендуется применять технологию geobody как наиболее эффективную в случае использования данных объемной сейсморазведки. В зависимости от комбинации сейсмических атрибутов, участвующих в анализе, определяются распределения различных свойств горных пород, в том числе зоны повышенной пористости или зоны присутствия углеводородов. Анализ с одновременным использованием нескольких сейсмических атрибутов позволяет непосредственно выявить насыщенные углеводородами геологические тела с повышенной пористостью или другими физическими характеристиками.

В работе приведены примеры выявления ловушек углеводородов на площадях и месторождениях северного борта ДДВ, которые подтверждены бурением скважин. Приведен пример рекомендаций на бурение скважин с использованием распределений значений различных сейсмических атрибутов.

Сделано обобщение в отношении распределения перспективных на наличие углеводородов участков на северном борту ДДВ и взаимосвязи этого распределения с выявленными структурными элементами геологической среды.

Ключевые слова: сейсморазведка, сейсмические изображения, ловушки углеводородов различных типов, сейсмические атрибуты, геологические тела, прямые индикаторы углеводородов.

УДК 551.14

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.06>

П. Пігулевський, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.;
Л. Шумлянська, канд. геол. наук, наук. співроб.,
E-mail: lashum@ukr.net;

Ю. Дубовенко, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.;
Інститут геофізики НАН України ім. С.І. Субботіна,
просп. Палладіна, 32, м. Київ, Україна

ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ЗА СЕЙСМОТОМОГРАФІЧНИМ ГЕОТРАВЕРСОМ "ВІННИЦЯ – ТАГАНРОГ"

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

Розглянуто методичні аспекти та результати вивчення стратиграфічного розрізу верхньої мантії вздовж сейсмотомографічного геотраверсу "Вінниця – Таганрог". Для локалізації різних особливостей стану мантії, які можуть бути пов'язані зі зміною речовинного складу, густини субстрату, температури тощо було застосовано аналіз кривих першого та другого градієнта швидкості з пошуком точок перегину на первинній швидкісній кривій v_p , яка була отримана при побудові сейсмотомографічної моделі за методом Тейлорової апроксимації. Перед аналізом кривизни проводилась процедура згладжування відповідно до довжини хвиль, що відповідають зонам Френеля, які охоплює хвиля в мантії на певних глибинах. За вказаною методикою розраховано криві швидкостей v_p і градієнтів швидкостей для верхньої мантії під основними тектонічними структурами Українського щита (УЩ) вздовж геотраверсу "Вінниця – Таганрог", який перетинає Подільський і Бузький мегаблоки, Голованівську шовну зону, Інгульський мегаблок, Криворізько-Кременчуцьку шовну зону, Середньопридніпровський мегаблок, Оріхівсько-Павлоградську шовну зону і Приазовський мегаблок.

За результатами досліджень були виділені найбільш значимі особливості будови мантії в інтервалі глибин 50–750 км. З позиції тектоніки УЩ виділена трансрегіональна тектонічна зона (розташована між точками 30.0E, 49N і 32.0E, 48.25N), над якою розташовані Голованівська шовна зона (ГШЗ), східна частина Бузько-Росинського мегаблока і західна – Інгульського, де спостерігаються значні порушення загальної мантіїної межі, що називається межею 660 км – між верхньою та середньою мантіями. Під Подільським мегаблоком ця межа розташована на глибинах 550–560 км. Під ГШЗ вона піднімається вище, до відміток 450–460 км, а на схід від шовної зони вона різко опускається до 660–670 км і набуває субгоризонтального положення. Різкий стрибок до відміток 450–460 км показує глобальну зону зриву і характер контакту між різними геодинамічними мантійними областями сучасної платформи.

Ключові слова: градієнтний аналіз, мантіїні межі, геодинаміка.

Вступ. Метою представленої статті – є ознайомлення наукового товариства з використанням відомого градієнтного аналізу для трансформації швидкісних сейсмотомографічних розрахунків у модель з обґрунтовано виділеними межами в неоднорідній мантії.

Для виділення топоморфологічних особливостей аномалій в мантії було використано трансформацію швидкісного сейсмотомографічного розрізу первинної моделі (Гейко *и др.*, 2005). Критеріями виділення меж були вибрані точки перегинів градієнтних кривих. Подібний підхід був використаний L.R. Johnson 1969 р. (Johnson, 1969). Узявши до уваги сукупність ознак по перших і других похідних, ми визначаємо розмірність отриманої об'єднаної матриці вздовж профіля як 2,5 (Shumlianska *et al.*, 2020). Виділені межі аномалій градієнтів (похідних) дозволяють локалізувати різні особливості стану мантії, які можуть бути пов'язані зі змінами речовинного складу, аномаліями густини, температури тощо (Пігулевський *та ін.*, 2014). Сподіваємось, що подальше вивчення інформації, отриманої на основі побудованої моделі, дозволить дослідникам наблизитися до розуміння природи мантії.

Мета роботи – вивчення стратиграфічного розрізу верхньої мантії вздовж томографічного геотраверсу "Вінниця – Таганрог" за допомогою аналізу значень першого градієнта кривої Р-хвилі (v_p), який, відповідно до його фізичного змісту, дозволяє відокремити ділянки з різним прискоренням швидкості, виділити за результатами досліджень найбільш значимі особливості будови мантії в інтервалі глибин 50–750 км.

Об'єкти та методи. В основу наших розрахунків покладена сейсмотомографічна модель мантії під територією України (Гейко *и др.*, 2006), побудована за методом Тейлорової апроксимації (Гейко, 2004). Згідно з цією методикою годографи, які в подальшому шляхом інверсії перераховуються у швидкісні криві, збираються для виділеного об'єму геофізичного середовища у форматі серединної точки. Для побудови загального годографа

використано тільки час перших вступів Р-хвиль, хоч попередні хвилі S більш чутливі до рідкої фази речовини. Причина, з якої були використані тільки дані по Р-хвилям, тривіальна – недостатня кількість визначень часу вступів S-хвилі у сейсмологічних бюлетенях. Само по собі визначення часу першого вступу поперечних S-хвиль – завдання неоднозначне. У практичній сейсмології інтерпретатор має застосовувати декілька методів аналізу, крім візуального. Для певного виділення користуються поляризаційним методом, який дозволяє простежувати за рухом частинки в тривимірному просторі, вейлвет аналізом та іншими методами, рекомендованих в інструкціях для сейсмологів, що надаються разом з відповідним програмним комплексом WSG (Програма WSG, *н.д.*), SeisGRAM (SeisGRAM2, *н.д.*), SeisCOMP3 (SeisCOMP3, *н.д.*). Тому за масової обробки, якщо виникають сумніви щодо чіткості чи правильності визначення вступу S-хвилі, її час не вказують у бюлетенях, щоб не збільшувати похибку визначень часу вступу хвиль. Для побудови годографів у моделі для мантії під територією України (Гейко *и др.*, 2005, 2006) було використано загальнодоступний Сейсмологічний бюлетень Міжнародної сейсмологічної служби ISC із 1970 р. по 2012 р. Для Українського щита (УЩ), територія якого розташована в малосейсмічній зоні, завдання пошуку даних про вступ хвиль ще більш ускладнюється, оскільки кількість первинного матеріалу вкрай мала для побудови годографів. Крім того, кількість сейсмічних станцій невелика, їхнє розташування нерівномірне, що ще більш погіршує ситуацію зі збором первинного матеріалу. Для порівняння, на сьогодні мережа сейсмічних станцій Інституту геофізики НАН України становить 27 станцій, 20 з яких розташовані в Карпатському регіоні. Необхідна кількість станцій для оптимальної мережі має становити 137 станцій, які мають розташовуватись по рівномірній сітці по всій території України (Burminand Shumlianska, 2020). Таким чином, Р-хвилі для побудови томографічної моделі були вибрані через відсутність іншого джерела первинної інформації.

Визначення меж у мантії проводилось за допомогою аналізу кривих першого та другого градієнта швидкості з пошуком точок перегину на швидкісній кривій v_p . Перед аналізом кривизни проводилась процедура згладжування відповідно до довжини хвиль чи зони Френеля, які охоплює хвиля в мантії на певних глибинах. Ця процедура проводилась з метою видалення хибних флуктуацій, що утворюються при інверсії годографів у швидкісні криві.

Еталоном для розрахунку довжини хвилі була взята модель IASP-91 як одна з найпопулярніших і відомих моделей (Kennett, 1991). Щоб показати, що вибір швидкісної моделі не має принципового значення для процедури згладжування, на рис. 1 винесені розраховані довжини хвиль при періоді коливань сейсмічної хвилі 5 с

для різних швидкісних моделей: моделі IASP – 1, PEM – 2 (Жарков, 2013), модель Гейка – 3. Як видно з рисунка, усі швидкісні криві в мантії майже збігаються за числовими значеннями, але відмінні за геометрією. Узагальнюючи швидкісні моделі, відомі на сьогодні, найбільші відмінності швидкісні криві мають у верхній частині розрізу, у земній корі та прилеглій до границі Мохоровичича (Мохо) мантії. Що стосується розривів суцільності, то в перерахунку на довжину хвилі різниця становить близько 5 км довжини хвилі. При цьому крок згладження по швидкісній кривій у початковій моделі становить 25 км, а після 50, тобто в масштабах фізичної правдоподібності можливостей для даного метода, визначення аномалій величиною 5 км не має значення.

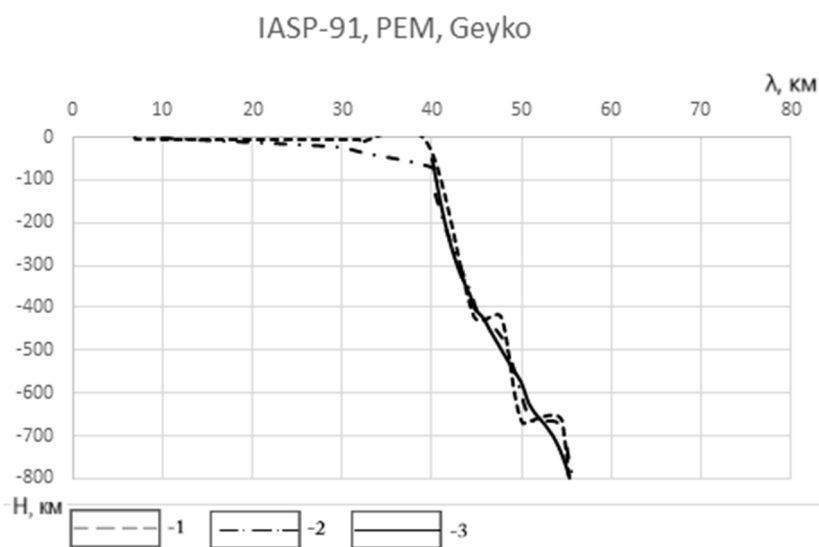


Рис. 1. Довжина хвилі для землетрусів з періодом поздовжніх хвиль 5 с, розподіл швидкостей з глибиною для різних моделей: IASP – 1, PEM – 2, модель Гейка – 3

На глибинах 0–700 км довжина хвилі коливається в межах 30–50 км. Це дає нам приблизну оцінку роздільної здатності променевого методу сейсмічної томографії, у тому числі в наближенні Тейлора. Перший етап аналізу полягає в усуненні можливих штучних аномалій і флуктуацій швидкісної кривої, створених внаслідок роботи алгоритму чисельного звернення годографа в швидкісну криву, що є процедурою згладжування кривої v_p з кроком, порівняним з довжиною хвилі. Він дорівнює 30 км – для глибин 0–200 км (літосфера) і 50 км для глибин від 200 до 700 км.

Межі мантійних неоднорідностей, визначені по точкам екстремумів першого градієнта кривої v_p (Pigulevskiy et al., 2019), дозволили відділити ділянки з різним прискоренням швидкості (відповідно до фізичного змісту градієнта) у стратиграфічному розрізі верхньої мантії. У межах кожного інтервалу з однаковим значенням прискорення ми припускаємо наявність аномалії (шару) мантійної речовини, імовірно, однакової природи. Точки перегину другого градієнта v_p , які визначаються за точками екстремумів градієнтної кривої ($\text{grad} v_p$), показують положення максимуму і мінімуму градієнтної кривої $\text{grad} v_p$, що дає важливу додаткову інформацію про локальні варіації швидкостей у мантії з глибиною. Фізичний сенс градієнта другого рівня можливо трактувати як зональний розподіл мантійних аномалій (Pigulevskiy et al., 2019; Shumlianska et al., 2020).

За вказаною методикою розраховано градієнти швидкостей для верхньої мантії під основними тектонічними

структурами УЩ уздовж зведеного профілю А-А1, названого томографічним геотранверсом "Вінниця – Таганрог" (рис. 2). Профіль перетинає Подільський і Бузький мегаблоки, Голованівську шовну зону, Інгульський мегаблок, Криворізько-Кременчуцьку шовну зону, Середньопридніпровський мегаблок, Оріхівсько-Павлоградську шовну зону і Приазовський мегаблок. Кожен вертикальний стовпець у межах виділеного блока має прив'язку до центральній географічній координати і представлений 1D швидкісною кривою v_p .

Межі блоків (рис. 2) визначено після аналізу поля середніх швидкостей, зібраних за даними глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ), і віднесених до головних тектонічних одиниць, мегаблоків і шовних зон. Дані про середні швидкості були використані для врахування впливу наближених до реальних даних по швидкостях у корі на швидкості у верхній мантії (Шумлянська і др., 2014).

Результатом градієнтного аналізу можуть бути як числа матриця, так і матриця векторів, яка показує напрямки зміни значень. Можливість використання різних видів візуалізації градієнтного аналізу дозволяє виділяти різні особливості структури швидкісної матриці і як результат – отримати додаткові варіанти для інтерпретації. На рис. 3–4 проілюстровано можливості різних видів візуалізації градієнтного аналізу, що дозволило виділити ряд найбільш значимих особливостей будови мантії й у першу чергу – найбільш контрастні межі в інтервалі глибин 50–750 км.



Рис. 2. Схема розташування зведеного профілю А-А1 (геотраверс "Вінниця – Таганрог") уздовж основних структур Українського щита.

Розподіл структур і опис їхніх швидкісних характеристик наведено в роботі (Шумлянська і др., 2014); цифри: 1 – середня потужність земної кори; 2 – середня швидкість у шарі 0–15 км;

3 – середня швидкість у шарі 15 км (Мохо); 4 – швидкість над Мохо.

Інші позначення: I – Волинський мегаблок; II – Подільський мегаблок; III – Росинський мегаблок; IV – Бузький мегаблок; V – Голованівська шовна зона; VI – Інгульський мегаблок; VII – Криворізька-Кременчуцька шовна зона; VIII – Середньопридніпровський мегаблок; IX – Оріхівсько-Павлоградська шовна зона; X – Приазовський мегаблок

Результати та їхнє обговорення. Побудований сейсмічний розріз верхньої мантії та виділені межі вздовж геотраверсу "Вінниця – Таганрог" добре зіставляються із загальноприйнятими межами в мантії, виділеними сейсмологічними методами як за стрибками швидкості, так і по прекурсорах різних фаз відбиття PP, SS та інших (Johnson, 1969; Deuss et al., 2013).

Перший, більш детальний варіант розподілу локальних мантійних неоднорідностей, побудований по перегибах градієнтів швидкісних кривих grad_{v_p} ; і доповнений значеннями другої похідної $\text{grad}(\text{grad}_{v_p})$, наведено в ро-

боті (Pigulevskiy et al., 2019; Shumlianska et al., 2020), а ми нижче розглянемо більш узагальнений варіант, отриманий шляхом візуалізації числової матриці за допомогою програмного комплексу SURFER. Матриця, що показує числові значення градієнта вздовж томографічного геотраверсу, отримана в результаті розрахунку градієнта кривої v_p у кожній базовій точці. Вона дозволяє перетворити набір точок 1D зондування з відстанню між ними від 75 до 100 км уздовж умовного профілю А-А1 у 2D ґрид-модель. Значення градієнтів приведені до розмірності 50 x 50 км, що пов'язано із кроком згладжування по швидкісній кривій.

За результатами побудов (рис. 3) на розрізі виділяється досить контрастні лінійно-витягнуті аномалії перших похідних градієнтів швидкостей v_p з розривом і зсувом в інтервалі точок 29.25E, 49N і 31.5E, 48.5N. Західніше від них розташована вісь максимумів значень градієнтів на глибинах 560–570 км, а східніше вона залягає субгоризонтально на відмітках 660–680 км. Треба зазначити, що виділяється субгоризонтальний характер мантійних меж з малими кутами нахилу. Субвертикальні межі мантійних неоднорідностей добре простежуються по зсувах осей максимумів аномалій першого градієнта швидкості. У місцях різкої зміни положення меж були виділені розривні порушення (рис. 3).

На рис. 4 ґрид-модель перших градієнтів представлена у вигляді векторів, які показують напрямки зміни поля градієнтів швидкості. Саме уявлення у вигляді векторів нашоухе на аналогію з конвекційними комітками, в яких показано напрямки "руху" речовини в мантії. Таке відображення результатів досліджень має сенс, оскільки тільки за наявності градієнтів будь-якого фізичного або хімічного параметра виникає "рух" речовини. Таким чином, пред-

ставлене векторне зображення (рис. 4) показує квазідинамічну картину, а швидкість та її градієнт відображає не тільки статичну, але й динамічну складову.

Відповідно до сучасних уявлень про будову мантії в ній виділяються три основні зони. Верхня мантія (до 660 км) – сама неоднорідна частина, включає три найбільш вивчені розділи мантії: границя Мохо; підшова літосфери на глибині ≈ 410 км; нижня межа ≈ 660 км (Flanagan and Shearer, 1998; Houser et al., 2008). Топографія мантійних меж чутлива до геодинамічних умов (Тараканов і Веселов, 2014), присутність різних флюїдів (Литасов, 2011), а також існування гарячих точок (плюмів) на різних глибинних рівнях і на різних стадіях функціонування (Ладынин, 2006; Теркотт і Шуберт, 1985).

Згідно з різними уявленнями градієнтного аналізу (рис. 3, 4) найбільш опущена частина межі 660 км розташована від точки 31.5E, 48.5N до 38.5E, 47.75N. Це відповідає на поверхні докембрійському щиту з імовірно більш холодною верхньою мантією. Під точкою з координатою 31.5E, 48.5N та навколо неї відбувається різкий стрибок цієї межі до позначки ≈ 450 км. Зсув осі значень першої похідної градієнтів швидкостей v_p досить різкий, що, імовірно, указує на те, що верхня мантія на цих глибинах перебуває в крихко-пластичному стані. Під точкою 29.25E, 48.5N позначається її різке занурення на 40–50 км (рис. 3), після якого вона знову стає субгоризонтальною з глибиною залягання 550–560 км. Як показано на рис. 3, в інтервалі геотраверсу між точками з координатами 29.25E, 48.5N – 31.5E, 48.5N спостерігається глибокий мінімум гравітаційного поля (у редукції Буге зі щільністю проміжного шару $2,3 \text{ г/см}^3$) та його амплітудно-спектральні характеристики різняться на захід і схід від мінімуму.

З позиції тектоніки УЩ виділена трансрегіональна зона, розташована між точками 30.0E, 49N і 32.0E, 48.25N, над якою розташовані Голованівська шовна зона (ГШЗ), східна частина Бузько-Росинського мегаблока і західна – Інгульського. На всіх візуальних представленнях градієнтного поля швидкостей ми спостерігаємо цю зону у вигляді значних порушень загальної мантійної межі, що називається межею 660 км – між верхньою та середньою мантіями (рис. 3, 4). Для західної частини УЩ, представленої Подільським мегаблоком, ця межа піднята до глибини 550–560 км. Під ГШЗ вона піднімається ще вище – до 450–460 км, а на схід від шовної зони межа верхньої та середньої мантії різко опускається до 660–670 км.

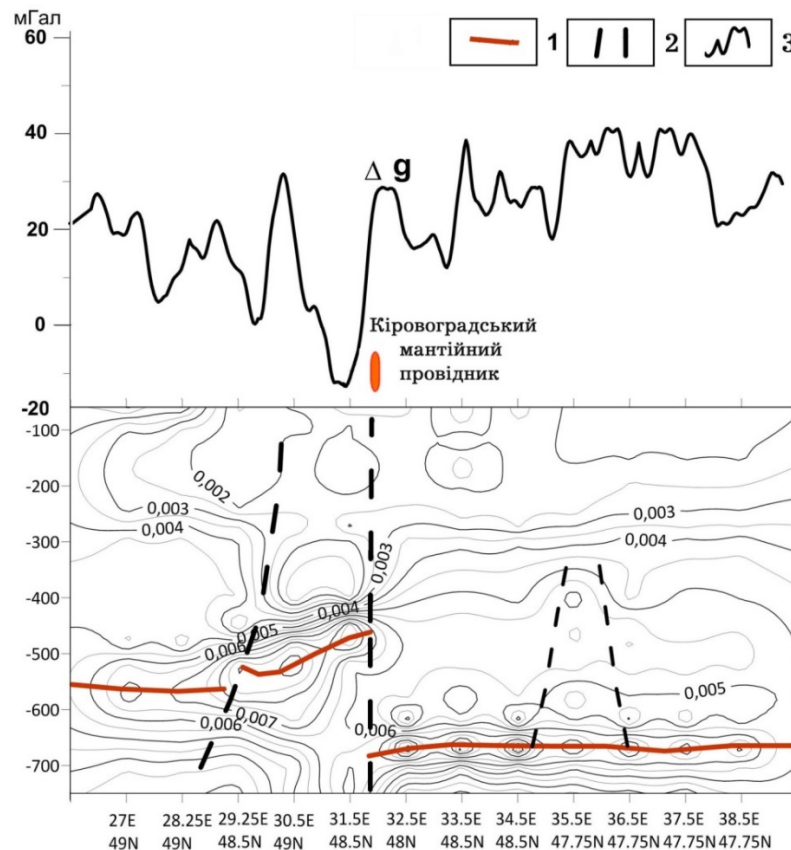


Рис. 3. 2D модель розподілу першої похідної градієнтів швидкостей v_p уздовж профілю А-А1.

Умовні позначення: 1 – осі максимальних значень першої похідної градієнтів швидкостей ($\text{grad } v_p$);

2 – субвертикальні розломи у верхній мантиї; 3 – крива сили тяжіння (мГал)

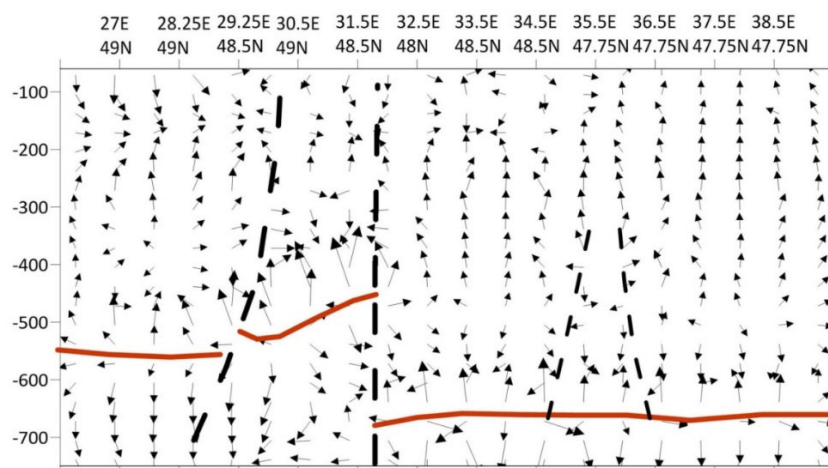


Рис. 4. 2D модель розподілу векторів першої похідної градієнтів швидкостей v_p уздовж профілю А-А1.

Умовні позначення: див. рис. 3

Один із варіантів геодинамічної інтерпретації описаної поведінки межі 660 км – відповідно до роботи (Тараканов і Веселов, 2014) опускання межі між верхньою і середньою мантиями характерне для зон геодинамічної взаємодії континентів. Таким чином, у межах щита виділено дві різні континентальні структурно-формаційні або геодинамічні зони, поділ між якими у верхній частині земної кори – Голованівська шовна зона. Але по одному томографічному геотраверсу зробити однозначну відповідь неможливо. Треба робити розрахунки за серією профілів, які перетинають із заходу на схід територію України.

У межах виділеної трансрегіональної тектонічної зони розташовані західна і південно-західна частини

Корсунь-Новомиргородського анортозит-рапаківі-гранітного плутону і Новоукраїнського масиву гранітоїдів, приурочених до інтенсивних аномалій градієнта поля сили тяжіння. Згідно з моделлю розподілу густини (Купрієнко та ін., 2007) для цієї зони із глибини 20 км характерно підвищення її значень порівняно із сусідніми структурами. Густина порід плутону становить $2,88 \text{ г/см}^3$, а в межах Новоукраїнського масиву вона змінюється таким чином: на заході максимальна і становить 2,91, на півночі – 2,87, а в південній частині масиву – 2,85–2,86 г/см^3 . Поява в розрізі земної кори густинних порід показує активізацію мантиї згідно з геохронологічним датуванням в протерозойський час.

Підтвердженням наших розрахунків і побудов (рис. 3, 4) може служити і те, що на докембрійському зрізі в земній корі й у верхах мантиї Інгільського мегаблока раніше проведеними геолого-геофізичними дослідженнями встановлено Кіровоградський глибинний розлом, до якого приурочені корові й мантийні аномалії високої електропровідності й підвищеного теплового потоку, що тягнуть до виділеної нами східного розлому (32.0E, 48.25N). Максимальні значення тангенціального аномального магнітного поля геомагнітних варіацій спостерігаються у східній компоненті, тоді як значення аномалії в північній компоненті не перевищують 20 % нормального поля. Таке співвідношення значень компонент аномальних полів, а також просторова орієнтація векторів індукції вказують на субмеридіональне простягання індукційних струмів у провідниках. Експериментальні спостереження (Дьяконова та ін., 1986) як по магнітоваріаційних профілях (МВП), так і магнітотелуричних зондуваннях (МТЗ), у першому наближенні, указують на значну протяжність області високої провідності на глибину. У літературі є вказівки і на високі значення теплового потоку в межах Кіровоградської аномалії електропровідності (Кутас, 1993), а за даними (Гордієнко та ін., 2004), температура на глибині 50–75 км змінюється від 1000 до 1300 °C, що дозволило авторам зробити припущення про новітню активізацію тектоносфери. Такі високі температури можуть викликати зменшення питомого електричного опору в цьому інтервалі глибин. Водночас експериментальні дослідження питомої електричної провідності водомістких порід (Olhoeft, 1981) указують на виразне збільшення електропровідності в інтервалі температур 500–700 °C, що може бути симптомом початкового часткового плавлення, і тоді аномалії електропровідності можуть допомогти в ідентифікації областей можливого плавлення або гідратації. У районі досліджень спостерігається і неоднорідний розподіл швидкостей поздовжніх сейсмічних хвиль у верхній мантиї, причому в районі аномалії електропровідності значення швидкостей зменшуються (Гейко та ін., 2005), що додатково підтверджує збільшення температури, яка може служити причиною для збільшення питомої електропровідності на цих глибинах.

Друга тектонічна зона менших розмірів установлюється під точками 35.0E, 47.75N і 36.5E, 47.75N і розташована під Оріхівсько-Павлоградською шовною зоною. Її продовження в північному напрямку простягається до перехідної зони від Дніпровсько-Донецької западини до Донецького складчастого спорудження. Також треба зазначити, що над нею розташовано Новополтавське (Чернігівське) карбонатитове родовище, яке, згідно з узагальненням світових даних (Фролов та ін., 2005), пов'язується з великими глибинами осередків магматизму при їхньому закладенні (Пігулевський та ін., 2014).

Саме положення УЩ визначає особливості геодинамічного розвитку та тектонічно-магматичні його прояви. Згідно з роботами Є.І. Паталахи (Паталаха та ін., 2004) – УЩ є передовим передсубдукційним валом південно-західного форланда Східно-Європейського кратону типу forebulge. Знайдена нами топографія мантийних меж, наперед між 660 км, показує, що геодинамічна взаємодія не обмежується верхньої частиною розрізу, літосферою та земною корою. А тектонічні розломи та магматичні комплекси, які виділені в земній корі, є проявами мантийних геодинамічних процесів взаємодії мантийних доменів. Фронтальне положення УЩ визначає колізійний характер взаємодії мантийних доменів, що відображується на будові мантийних меж. Різний вік активізації магматизму від протерозойського часу до сучасних проявів активізації, таких як геотермальні ано-

малії та аномалії електропровідності, є доказом перманентного стану підвищеної активності мантиї під УЩ в умовах високого літостатичного тиску. Топологія межі 660 км показує різкі перепади глибин її розташування під впливом високого тиску. Існує імовірність існування в мантиї флюїдів, які також є індикатором зміни глибини мантийних меж (Литасов, 2011).

Висновки. Метод градієнтного аналізу дав можливість провести обробку первинної сейсмотомографічної моделі з метою отримання різних її трансформацій, які надали додаткову інформацію для візуалізації вихідних даних. Різні уявлення градієнтного поля (у цифровому вигляді або векторному) дозволило розглянути різні аспекти швидкісної моделі мантиї при її геолого-геофізичній інтерпретації.

Цифрове подання аномалій першої похідної швидкісних кривих grad_v в ізолініях дало можливість більш чітко виділити топоморфологічні особливості аномалій в мантиї, особливо межі 660 км, для подальшої петрологічної й геодинамічної інтерпретації. Представлене векторне зображення показує квазідинамічну картину з вірогідним напрямком переміщення мантийного субстрату, що дозволяє розглядати не тільки статичну, але й динамічну складову фізико-хімічних процесів у мантиї.

Межа між верхньої та середньої мантиєю під східною частиною Українського щита (на схід від ГШЗ) розташована на глибині 660–670 км, що підтверджує сучасне уявлення про наявність фізичної межі між верхньою та середньою мантиями.

За результатами наших досліджень було виділено різкий стрибок межі між верхньою та середньою мантиями під Голованівської шовної зоною. На схід від ГШЗ вона розташована на глибині 660–670 км, а на захід (Подільський і Волинський мегаблоки) – піднята до відміток 550–560 км, при цьому в зоні переходу має різкий стрибок до 450–460 км. Таку поведінку межі можливо пояснити тим, що і в теперішній час відмічається дві різні за своєю активністю зони геодинамічної взаємодії континентальних мантийних доменів, які не простежуються на сучасному геологічному зрізі.

У земній корі над виділеною мантийною зоною розташовані західна і південно-західна частини Корсунь-Новомиргородського аноксидит-рапакові-гранітного плутону і Новоукраїнського масиву гранітоїдів та Кіровоградський глибинний розлом, до якого приурочені нинішні корові й мантийні аномалії високої електропровідності й підвищеного теплового потоку.

Список використаних джерел

- Гейко, В.С. (2004). Общая теория сейсмической томографии времен пробега. *Геофизический журнал*, 2, 3–32.
- Гейко, В.С., Цветкова, Т.А., Шумлянская, Л.А., Бугаенко, И.В., Заец, Л.Н. (2005). Трёхмерная скоростная модель верхней мантии Сарматии (юго-запад ВЕП). *Геофизический журнал*, 27(6), 927–939.
- Гордиенко, В.В., Гордиенко, И.В., Завгородняя, О.В., Логвинов, И.М., Тарасов, В.Н., Усенко, О.В. (2004). Геотермический атлас Украины. Киев.
- Дьяконова, А.Г., Ингер, А.И., Рокитянский, И.И. (1986). Электромагнитное зондирование на Восточно-Европейской платформе и Урале. К.: Наук. думка.
- Жарков, В.Н. (2013). Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику. М.: ООО "Наука и образование".
- Купrienko, P.A., Makarenko, I.B., Starostenko, V.I., Legostayeva, O.V. (2007). Трёхмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Украинского щита. *Геофизический журнал*, 29(5), 3–27.
- Кутас, Р.И. (1993). Тепловое поле и геотермический режим литосферы. Литосфера Центральной и Восточной Европы. Обобщение результатов исследований. К.: Наук. думка.
- Ладынин, А.В. (2006). Региональная геофизика. Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т.
- Литасов, К.Д. (2011). Физико-химические условия плавления мантии Земли в присутствии C-O-H флюида по экспериментальным данным. *Геология и геофизика*, 52, 613–635.

Паталаха, Е.И., Сенченков, И.К., Трофименко, Г.Л. (2004). Проблемы тектоно-геодинамической эволюции Юго-Западного фоланда Восточно-Европейского крана и его орогенического обрамления. К.: ПП "ЕМКО".

Пигулевский, П.И., Свистун, В.К. (2014). Геолого-геофизическая модель Приазовского мегаблока Украинского щита (анализ, моделирование, результаты). Донецк: "Ноулидж" (Донецкое отделение).

Программа WSG (н.д.). Отримано із http://www.gsrar.ru/new/wsg_arm.htm

Тараканов, Р.З., Веселов, О.В. (2014). Полиморфные превращения в верхней мантии для различных тектонических зон. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(23), 58–68.

Теркотт, Д., Шуберт, Д. (1985). Геодинамика. Ч. 1. М.: Мир.

Фролов, А.А., Лапин, А.В., Толстов, А.В., Зинчук, Н.Н., Белов, С.В., Бурмистров, А.А. (2005). Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минералогия, прогноз). НИА-Природа.

Burmin, V.Y., Shumlianska, L.A. (2020). Design of the Optimal Seismological Network in Ukraine. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 3651–3665. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02453-9>.

Deuss, A., Andrews, J., Day, E. (2013). Seismic observations of mantle discontinuities and their mineralogical and dynamical interpretation. In: S.-I. Karato, (Eds.), *Physics and Chemistry of Deep Earth*, p. 287–323. USA: Wiley.

Flanagan, M.P., Shearer, P.M. (1998). Global mapping of topography on transition zone velocity discontinuities by stacking of SS precursors. *J. Geophys. Res.*, 103 (B2), 2673–2692.

Houser, C., Masters, G., Flanagan, M.P., Shearer, P.M. (2008). Determination and analysis of long wavelength transition zone structure using SS precursors. *Geophys. J. Int.*, 174, 178–194.

Johnson, L.R. (1969). Array measurements of P velocities in the lower mantle. *Bull. of Seismol. Soc. of America*, 59(2), 973–1008.

Kennett, B.L.N. (Compiler and Editor). (1991). "IASPEI 1991 Seismological Tables." Bibliotech, Canberra, Australia. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00863.x>.

Olhoeft, G.R. (1981). Electrical properties of granite with implications for the lower crust. *J. Geophys. Res.*, 86, 931–936.

Pigulevskiy, P.I., Shumlianska, L.A., Dubovenko, Yu.I., Svystun, V.K. (2019). The mantle disruptions by P-waves velocity gradients analysis under East of Ukrainian Shield. *18th Int. Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, Kyiv, Ukraine, May 13–16, 688–693. Отримано із <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=98574>. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902151>.

SeisCOMP3 (н.д.). Отримано із <https://www.seiscomp3.org/>

SeisGRAM2 (н.д.). Отримано із <http://alomax.free.fr/seisgram/SeisGram2K.html>

Shumlianska, L.A., Pigulevskiy, P.I., Dubovenko, Yu.I. (2020). 2.5-dimensional model of mantle heterogeneities under the Ukrainian shield according to the gradients of the velocities of seismic waves. *Journ. Geol. Geoeology*, 29 (2), 431–441.

References

Burmin, V.Y., Shumlianska, L.A. (2020). Design of the Optimal Seismological Network in Ukraine. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 3651–3665. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02453-9>.

Deuss, A., Andrews, J., Day, E. (2013). Seismic observations of mantle discontinuities and their mineralogical and dynamical interpretation. In: S.-I. Karato, (Eds.) *Physics and Chemistry of Deep Earth*, p. 287–323. USA: Wiley.

Dyakonova, A.G., Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I. (1986). Electromagnetic sounding on the East European platform and the Urals. K.: Naukova dumka.

Flanagan, M.P., Shearer, P.M. (1998). Global mapping of topography on transition zone velocity discontinuities by stacking of SS precursors. *J. Geophys. Res.*, 103 (B2), 2673–2692.

P. Pigulevskiy, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher;

L. Shumlianska, PhD (Geol.), Researcher,

E-mail: lashum@ukr.net;

Yu. Dubovenko, PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher;

Institute of geophysics NAS of Ukraine S.I. Subbotina,

32 Palladina Ave., Kyiv, Ukraine

Frolov, A.A., Lapin, A.V., Tolstov, A.V., Zinchuk, N.N., Belov, S.V., Burmistrov, A.A. (2005). Carbonatites and kimberlites (relationships, mineralogy, prognosis). NIA Nature.

Geyko, V.S. (2004). General theory of seismic tomography of travel times. *Geophysical Journal*, 2, 3–32.

Geyko, V.S., Tsvetkova, T.A., Shumlianska, L.O., Bugaenko, I.V., Zaets, L.N. (2005). Three-dimensional velocity model of the upper mantle of Sarmatia (south-western EEP). *Geophysical Journal*, 27 (6), 927–939.

Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnaya, O.V., Logvinov, I.M., Tarasov, V.N., Usenko, O.V. (2004). Geothermal Atlas of Ukraine. Kyiv.

Houser, C., Masters, G., Flanagan, M.P., Shearer, P.M. (2008). Determination and analysis of long wavelength transition zone structure using SS precursors. *Geophys. J. Int.*, 174, 178–194.

Johnson, L.R. (1969). Array measurements of P velocities in the lower mantle. *Bull. of Seismol. Soc. of America*, 59(2), 973–1008.

Kennett, B.L.N. (Compiler and Editor). (1991). "IASPEI 1991 Seismological Tables." Bibliotech, Canberra, Australia. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00863.x>.

Kuprienko, P.Ya., Makarenko, I.B., Starostenko, V.I., Legostaeva, O.V. (2007). Three-dimensional density model of the earth's crust and upper mantle of the Ukrainian shield. *Geophysical Journal*, 29, 5, 3–27.

Kutas, R.I. (1993). Thermal field and geothermal regime of the lithosphere. The lithosphere of Central and Eastern Europe. Generalization of research results. K.: Naukova dumka.

Ladynin, A.V. (2006). Regional geophysics. Novosibirsk: Novosibirsk state University.

Litasov, K.D. (2011). Physico-chemical conditions for the melting of the Earth mantle in the presence of C-O-H fluid according to experimental data. *Geology and Geophysics*, 52, 613–635.

Olhoeft, G.R. (1981). Electrical properties of granite with implications for the lower crust. *J. Geophys. Res.*, 86, 931–936.

Patalakha, E.I., Senchenkov, I.K., Trofimenko, G.L. (2004). Problems of tectonic-geodynamic evolution of the South-West foreland of the East European craton and its orogenic setting. K.: PP "EMCO".

Pigulevskiy, P.I., Shumlianska, L.A., Dubovenko, Yu.I., Svystun, V.K. (2019). The mantle disruptions by P-waves velocity gradients analysis under East of Ukrainian Shield. *18th Int. Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, Kyiv, Ukraine, May 13–16, 688–693. Retrieved from <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=98574>. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902151>.

Pigulevskiy, P.I., Svystun, V.K. (2014). Geological and geophysical model of the Priazovsky megablock of the Ukrainian shield (analysis, modeling, results). Donetsk: Knowledge (Donetsk branch).

ProgramWSG(n.d.). Retrieved from http://www.gsrar.ru/new/wsg_arm.htm

SeisCOMP3 (н.д.). Retrieved from <https://www.seiscomp3.org/>

SeisGRAM2 (н.д.). Retrieved from <http://alomax.free.fr/seisgram/SeisGram2K.html>

Shumlianska, L.A., Pigulevskiy, P.I., Dubovenko, Yu.I. (2020). 2.5 dimensional model of mantle heterogeneities under the Ukrainian shield according to the gradients of the velocities of seismic waves. *Journ. Geol. Geoeology*, 29 (2), 431–441.

Tarakanov, R.Z., Veselov, O.V. (2014). Polymorphic transformations in the upper mantle for various tectonic zones. *Vesnik KRAUNTS. Earth Sciences*, 1 (23), 58–68.

Turcott, D., Schubert, D. (1985). Geodynamics. Part 1. M.: World.

Zharkov, V.N. (2013). The internal structure of the Earth and planets. An elementary introduction to planetary and satellite geophysics. M.: LLC Science and Education.

Надійшла до редколегії 15.09.2020

FIRST RESULTS OF THESEISMIC TOMOGRAPHIC GEOTRAVERSE "VINNYTSIA – TAGANROG" RESEARCH

Methodological aspects and results of studying of the stratigraphic section of the upper mantle along the seismic tomographic geotransverse "Vinnytsia – Taganrog" are considered in the article. To localize mantle anomalies associated with changes in the composition, density of the substrate, temperature, etc., an analysis of the curves of the first and second velocity gradients was used to search for the inflection points of the v_p curve. A velocity curve was obtained by constructing a seismotomographic model using the Taylor approximation method. Before the curvature analysis, a smoothing procedure was carried out in accordance with the wavelength. This procedure is important for screening false anomalies, the size of which is responsible for Fresnel zones, since the resolution of the seismic wave has the dimension of the Fresnel zones. According to this technique, the curves of the first and second velocity gradients v_p were calculated for the upper mantle under the main tectonic structures of the Ukrainian Shield along the "Vinnytsia – Taganrog" geotransverse. The profile crosses the Podol, Bug megablocks, Golovanev suture zone, Ingul megablock, Kryvyi-Rig-Kremenchug suture zone, Middle-Dnipro megablock, Orekhovo-Pavlograd suture zone and Azov megablock.

According to the results, the most significant features of the mantle structure were identified in the depth interval of 50–750 km. A transregional tectonic zone was distinguished (between points 30.0E, 49N and 32.0E, 48.25N), over which the Golovan suture zone (GSZ) and the eastern part of the Bug-Ros megablock and the western part of Ingul, where significant violations of the common mantle border of 660 km are observed – a border between the upper and middle mantle. Under the Podol megablock, this border is located at a depth of 550–560 km. Under GSZ it rises to 450–460 km, and to the east of the suture zone it drops sharply to 660–670 km, where it takes a subhorizontal position. A sharp jump to marks of 450–460 km shows the global breakdown zone and the nature of the contact between different geodynamic mantle regions under the modern platform.

Keywords: gradient analysis, mantle boundaries, geodynamics.

П. Пигулевский, д-р геол. наук, ст. науч. сотр.;
Л. Шумлянская, канд. геол. наук, науч. сотр.,
E-mail: lashum@ukr.net;
Ю. Дубовенко, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.;
Институт геофизики НАН Украины им. С.И. Субботина,
просп. Акад. Палладина, 32, г. Киев, Украина

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКОГО ГЕОТРАВЕРСА "ВИННИЦА – ТАГАНРОГ"

Рассмотрены методические аспекты и результаты изучения стратиграфического разреза верхней мантии вдоль сейсмотомографического геотраверса "Винница – Таганрог". Для локализации мантийных аномалий, которые могут быть связаны с изменением состава, плотности субстрата, температуры и пр., был применен анализ кривых первого и второго градиента скорости для поиска точек перегиба кривой v_p . Скоростная кривая была получена при построении сейсмотомографической модели по методу Тейлоровой аппроксимации. Перед анализом кривизны проводилась процедура сглаживания в соответствии с длиной волны. Данная процедура важна для отсеивания ложных аномалий, размер которых меньше зон Френеля, поскольку разрешающая способность сейсмической волны имеет размерность зон Френеля. По указанной методике рассчитаны кривые первого и второго градиентов скоростей v_p для верхней мантии под основными тектоническими структурами Украинского щита вдоль геотраверса "Винница – Таганрог". Профиль пересекает Подольский, Бугский мегаблоки, Голованевскую шовную зону, Ингульский мегаблок, Криворожско-Кременчугскую шовную зону, Среднеприднепровский мегаблок, Орехово-Павлоградскую шовную зону и Приазовский мегаблок.

По результатам исследований были выделены наиболее значимые особенности строения мантии в интервале глубин 50–750 км. Выделена трансрегиональная тектоническая зона (между точками 30.0E, 49N и 32.0E, 48.25N), над которой расположена Голованевская шовная зона (ГШЗ), восточная часть Бугско-Росинского мегаблока и западная – Ингульского, где наблюдаются значительные нарушения общей мантийной границы 660 км – между верхней и средней мантией. Под Подольским мегаблоком эта граница расположена на глубине 550–560 км. Под ГШЗ она поднимается до 450–460 км, а на восток от шовной зоны она резко опускается до 660–670 км и принимает субгоризонтальное положение. Резкий скачок до отметок 450–460 км показывает глобальную зону срыва и характер контакта между разными геодинамическими мантийными областями под современной платформой.

Ключевые слова: градиентный анализ, мантийные границы, геодинамика.

ГЕОЛОГИЯ РОДОВИЩ КОРИСНЫХ КОПАЛИН

УДК 553.411.071

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.07>М. Мизерная, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: mizernaya58@bk.ru;

Г. Оразбекова, PhD, доц.,

E-mail: orazbekova@bk.ru;

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
ул. Серикбаева, 19, г. Усть-Каменогорск, 070004, Казахстан;

Б. Дьячков, д-р геол.-минералог. наук, акад. НАН РК, проф.,

E-mail: bdyachkov@mail.ru;

ТОО "Алтайский геолого-экологический институт", г. Усть-Каменогорск, Казахстан

А. Мирошникова, PhD,

E-mail: anastasiya-2588@mail.ru;

Филиал "НЦ КПМС РК", "ВНИИцветмет",

ул. Промышленная, 1, г. Усть-Каменогорск, 070002, Казахстан;

В. Зацерковный, д-р техн. наук, проф.,

E-mail: vitalii.zatsekovnyi@gmail.com;

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, УкраинаМОДЕЛИРОВАНИЕ МАГМАТОГЕННЫХ РУДНЫХ СИСТЕМ
ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

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

Посвящено результатам использования системного геологического моделирования при прогнозировании золоторудных месторождений на территории старейшего района золотодобычи в Республике Казахстан – Западно-Калбинского золоторудного пояса (Восточный Казахстан). Исследования направлены на разработку критериев прогноза и поисков новых рудных объектов в благоприятных геологических структурах. Основное внимание при проведении исследований было уделено системному анализу геологических факторов, взаимодействие которых обеспечивает синергетический эффект и выявление закономерностей формирования золоторудных объектов. Для решения этой задачи авторами произведена количественная оценка устойчивости развития рудогенерирующих элементов системы по методике С.В. Васильева.

Количественная оценка устойчивости отдельных факторов и их взаимодействия позволили оценить качественное состояние отдельных участков и определить естественные границы площадей соответствующего иерархического уровня, перспективных на поиски месторождений определенного полезного ископаемого.

Были проведены работы по выделению площадей, перспективных на поиски месторождений, на основе количественной оценки устойчивости отдельных факторов. С использованием геологических материалов, результатов геофизических работ, космогеологических данных произведена локализация перспективных площадей в пределах Западно-Калбинской структурно-формационной зоны и Жумбинской рудно-магматической системы в Восточном Казахстане.

Ключевые слова: рудно-магматическая система, золото, месторождение, оценка устойчивости геологических факторов.

Постановка проблемы. Рассматриваемая в данной статье Западно-Калбинская металлогеническая зона относится к северо-западному сектору Центрально-Азиатского подвижного пояса, тектоническое строение и эволюция которого была охарактеризована в работах (Mizernaya et al., 2018; Los, 2015; Rafailovich, 2009). Западно-Калба является лидером по потенциалу золота среди складчатых поясов Казахстана. Ее окончательное формирование как геологической структуры проходило в позднем палеозое в результате коллизии Казахстанского и Алтае-Монгольского палеоконтинентов. В строении данной территории участвуют отложения *алевролитовой аспидной* формации D_3fm_{1-2} , *базальтовая известняково-терригенно-кремнистая* формация фамена и ранневизейские образования представлены *известняково-песчаниково-алевролитовой* формацией. Отложения перекрываются флишеидной *углеродисто-известково-терригенной* формацией (C_{1V2-3}) мощностью 500 м и граувакковой *алевролитово-песчаниковой* формацией (C_{1s}) (Mizernaya et al., 2017).

Среди интрузивных образований к наиболее древним относятся протрузии серпентинитов, приуроченные к зоне Чарско-Горностаевского глубинного разлома. С девонским вулканизмом связаны базитовые субвулканические тела и дайки. В период коллизии внедрились малые интрузии и дайки (*габбронорит-диабазовая* формация, карабирукский комплекс C_{2-3}) и *плагиогранит-гранодиоритовая* формация (кунушский комплекс C_3), с которой связано золото-кварцевое и зо-

лото-сульфидно-кварцевое оруденение. Рудоконтролирующими являются системы северо-западных и широтных глубинных разломов (Чарско-Горностаевский, Западно-Калбинский, Кызыловский и др.), а также северо-восточные и меридиональные разломы, фиксируемые по геолого-геофизическим данным и дешифрированию космоснимков (Rafailovich, 2013). В пределах Западно-Калбинского золоторудного пояса обнаружено более 450 золоторудных месторождений и проявлений, однако многие из них изучены недостаточно и требуют постановки более детальных исследований. Проблема изучения золоторудных объектов на данной территории заключается в том, что хорошая геологическая изученность определяет низкую вероятность обнаружения новых месторождений, и основной задачей прогнозирования является "разбраковка" известных золоторудных объектов с целью выявления из их числа потенциальных крупных месторождений, требующих доразведки.

Анализ последних исследований и публикаций.

Большой вклад в изучение золоторудной металлогении региона внесли многие специалисты и научные сотрудники различных организаций (Ф.С. Подсеваткин, А.Я. Котов, Ю.А. Овечкин, В.И. Наливаев, В.В. Масленников, Н.И. Бородаевский, К.Р. Рабинович, В.И. Старов, Н.А. Фогельман, В.А. Нарсеев, В.А. Глоба, А.М. Мыслик, В.Д. Борцов, В.Н. Любечский, А.Ф. Коробейников, М.С. Рафаилович, Х.А. Бесплаев, Г.Н. Щерба, Н.В. Полянский, Б.А. Дьячков, М.А. Мизерная, В.Н. Майоров,

Ю.А. Антонов, А.А. Шатобин и др.). Основные результаты исследований прошлых лет отражены в многочисленных публикациях (Chekalin, D'yachkov, 2013; Mizernaya et al., 2018; Los, 2015; Rafailovich, 2009, 2013; Dolgoplova et al., 2015 и др.).

Прогнозные металлогенические исследования в регионе проводились в разные годы, в том числе авторами данной статьи, что отражено в работах (Mizernaya et al., 2018; Bespaev et al., 2013; Korobeinikov, 2011; Rafailovich, 2013). В качестве основных факторов локализации золотого оруденения в разные годы рассматривались геотектонические, литолого-стратиграфические, магматические, метаморфические, структурно-тектонические, минералого-геохимические и геофизические критерии. На основании обобщения геолого-геофизических материалов были разработаны основные типы моделей: структурно-металлогенические, полифакторные и геолого-генетические. Первые относятся к моделям объемного строения структурно-формационных зон и могут уточнить распределение оруденения в разрезе рудных поясов и металлогенических зон. Полифакторные модели рудных узлов и рудных полей учитывают тектоническую позицию в пределах структурно-формационных зон, особенности тектоники и ее связь с локализацией рудных месторождений, геофизические и геохимические характеристики и т.д. Третий тип представляет собой модели типовых месторождений и содержит характеристики рудовмещающих структур, параметры и форму рудных тел, геофизические характеристики рудных полей, зоны метаморфических преобразований пород, вещественный состав руд, их геолого-промышленные типы и основные этапы рудообразования (Tomson, 1988, с. 143).

Выявление нерешенных ранее частей общей проблемы. Все эти модели характеризуются различной степенью наполнения и достоверности геологической информации, что в результате, по мнению авторов, приводит к снижению результатов прогнозных построений. По представлениям ряда исследователей (Vasilyev, 1990; Mykhailov, 2019; Tretyakov, 2009) парадигмой современного прогнозирования должны являться представления о формировании месторождений в процессе развития рудообразующих систем. Структурные и статистические связи между элементами геологического пространства и месторождениями должны при этом интерпретироваться как закономерности размещения полезных ископаемых, на которых базируются вероятностные прогнозные построения.

Опыт прогнозных исследований свидетельствует об отсутствии доминантных факторов развития рудообразующих систем и размещения месторождений. В связи с этим, на основании представлений о взаимосвязи формирования месторождений с процессами эволюции недр, необходимым элементом прогноза является изучение и моделирование самоорганизующихся рудообразующих систем.

По представлению (Vasilyev, 1990; Mykhailov, 2019; Tretyakov, 2009), применительно к прогнозированию полезных ископаемых, важными методологическими правилами являются: учет автономности рудообразующих систем относительно вещественно-структурных особенностей геологической среды; отказ от концепции наличия "доминантных факторов" формирования и размещения рудных объектов. Представления об однотипности рудоконтролирующих структур согласуются с данными о принципиальной схожести геологических факторов, определяющих размещение золоторудных полей различных регионов мира. По мнению (Tomson, 1988), локальные площади развития эндогенного оруденения контролируются однотипными по своей природе

наложенными тектоно-магматическими структурами очагового характера. К ним относятся ареалы развития малых интрузий и ювенильные магматические флюиды по (Marakushev, 1983). Эти факторы инвариантны для различных этапов развития золоторудных провинций: сводообразования (Северный Казахстан, Васильковское месторождение); коллизионного (Бакырчик, Секисовка); позднеорогенного (Южный Тянь-Шань); тектоно-магматической активизации (Даурская зона); формирования зеленокаменных трогов (Канада, Зимбабве) (Tomson, 1988, с. 123). Авторами статьи была использована методика количественной оценки устойчивости развития рудогенерирующих элементов рудно-магматических систем (Letnikov, 1998).

Таким образом, взаимодействие ограниченного количества эндогенных геологических факторов приводит к формированию промышленных скоплений рудного вещества (месторождения), то есть к возникновению качественно нового образования, которого каждый из факторов в отдельности произвести не в состоянии. Подобное сочетание элементов литосферы в современном понимании – магматогенная рудная система, обладающая общими свойствами, не вытекающими из суммы свойств ее частей. В связи с этим ее реконструкция должна проводиться на основе методологии системного анализа. По представлениям Ф.А. Летникова, этим условиям наиболее всего отвечает направление системного анализа, рассматривающее геологическое пространство как пространственно-временной континуум, развитие которого обусловило формирование месторождений.

Формулирование целей статьи. Основная цель данной статьи – обоснование применения высокоэффективных прогнозных исследований для укрепления потенциала минерально-сырьевой базы Казахстана на золото. Предполагалось, что использование методики системного анализа позволит выделить набор геологических факторов, которые приводят к выявлению закономерностей формирования золоторудных объектов. Была предпринята попытка выделить площади, перспективные на поиски месторождений на основе количественной оценки устойчивости отдельных факторов.

Изложение основного материала исследований. В рамках данной методики, при выборе элементов количественной устойчивости показателей разной ранговости, нами проводились следующие исследования. В первую очередь проведена систематизация имеющихся материалов по геологическому строению, магматизму, тектоническим условиям формирования, особенностям рудной минерализации разнотипных золоторудных месторождений района. В дальнейшем это позволило выделить эталонные объекты, принадлежащие к различным геолого-минералогическим и геолого-промышленным типам. Была проведена оценка перспектив изучаемого района (на площади около 10 тыс. км²) с выделением перспективных площадей ранга рудных узлов. Далее, на площадях ранга рудных узлов были проведены исследования с определением более детальных площадей ранга рудных полей и произведена типизация рудовмещающих очаговых магматогенно-рудных систем, определяющих локализацию золотого оруденения. Это в итоге позволило составить схематические карты прогноза золоторудных месторождений на площади изученного района с количественной оценкой прогнозных ресурсов золота.

Принципиальная схожесть геологических факторов, определяющих размещение золоторудных месторождений и повторяемость геологических процессов в истории Земли (Mykhailov and Tots, 2018), определяют чрез-

вычайно важный тезис о том, что прогнозные процедуры, ориентированные на определенное полезное ископаемое, должны проводиться в границах региональных зон, геохимически (металлогенически) специализированных на это полезное ископаемое.

Можно сделать вывод, что металлогенические зоны представляют собой геохимически специализированный объем геологического пространства, сформированный на протяжении нескольких эпох рудогенеза. Промышленные месторождения одного полезного ископаемого, расположенные в его пределах, могут быть разновозрастными, коррелироваться с различными магматическими комплексами и принадлежать разным рудным формациям, что позволяет вовлекать в прогнозные исследования конкретные магматические образования определенного возраста и вещественного состава, сформированные в определенных тектонических циклах и эпохах.

В связи с этим была произведена реконструкция разновозрастных рудообразующих систем, выявление закономерностей размещения крупных золоторудных месторождений в системах разного уровня и выделение перспективных площадей и участков на основании установленных закономерностей.

Как было сказано выше, основными геологическими факторами, определяющими размещение золоторудных месторождений, были определены ареалы развития малых интрузий пестрого состава, узлы пересечения продольных и поперечных разломов, обеспечивающие наиболее проницаемые области и пути миграции ювенильных сквозьмагматических флюидов (Dolgopola, 2015). Эти элементы разделяются на три класса: рудогенерирующие, рудоподводящие и рудовмещающие (рудолокализирующие).

Рудогенерирующими представляются: собственно магматический процесс и парагенетически связанный с ним процесс привноса полезного компонента сквозь магматическими флюидами. Реконструкция и визуализация проявления этих процессов возможна путем изучения и структурирования продуктов их деятельности – интрузивных образований и золоторудных рудопоявлений и месторождений. Рудоподводящими являются глубинные разломы различной ориентации. К рудовмещающим (рудолокализирующим) относятся зоны пликативной и дизъюнктивной тектоники, развитые в пределах рудного поля.

Основное внимание отводится расшифровке структуры размещения и обоснованию совокупности геологических факторов, системное взаимодействие которых обеспечивает синергетический эффект и возможность выявления закономерностей расположения "эталонных объектов" в системе. Для решения этой задачи авторами произведен расчет количественной оценки устойчивости развития рудогенерирующих элементов путем вычисления "меры устойчивости". "Мера устойчивости" понимается как категория, отображающая количественную оценку качественного различия геологической ситуации участков с разной плотностью развития рудогенерирующих факторов. Для ее расчета авторами данной работы использована методика, предложенная С.В. Васильевым и апробированная А.В. Третьяковым при проведении прогнозных исследований на золоторудные объекты на Северо-Востоке Азии и при изучении закономерности размещения россыпей Казахстана (Tret'yakov, 2009).

Сущность этой методики заключается в преобразовании ноль-единичной картографической геологической информации (есть признак – нет признака) в относительную безразмерную количественную величину – меру

устойчивости развития фактора. Она вычислена с помощью палетки путем подсчета фактов "наличия–отсутствия" проявления оцениваемого фактора в элементарной ячейке площадью 4 км² и ближайшей окрестности каждой ячейки (окрестность включает 8 таких же элементарных ячеек). Значения меры изменяются от "0" до "9".

По результатам выделены продуктивные интервалы меры, интерпретированные затем как перспективные площади. Они соподчинены золотоносным поясам, вложены в них и иерархически отвечают рудным узлам. Результаты прогнозных исследований визуализированы на картах размещения перспективных золоторудных узлов на площади Западно-Калбинского золоторудного пояса (картах прогноза золотоносности) (рис. 1).

Данные (Pankratova et al., 2010; Naumov et al., 2014) показывают, что золотое оруденение преимущественно локализовано в пределах Западно-Калбинско-Коксентауской и Иртыш-Фуянской структурных зон (СЗ) и определяет их геохимическую специализацию – то есть задача выделения специализированных на золото региональных геохимических зон решена предшествующими исследователями.

Как видно (рис. 1), наибольшие масштабы золотоносности приурочены к Западно-Калбинскому золоторудному поясу. В Западно-Калбинском золоторудном районе наблюдается отчетливая иерархичность размещения объектов: рудный район – рудный узел, что свидетельствует о формировании соподчиненных диссипативных структур (рудные узлы) в процессе эволюции геологических структур более высокого порядка (рудные районы). В этом районе сконцентрировано наибольшее значительное количество месторождений и расположено уникальное месторождение Бакырчик (Antonov, 2010).

Как видно, размещение даек и малых интрузий в пределах изучаемого отрезка Западно-Калбинской зоны имеет явно выраженный очагово-поясовый характер. В целом они образуют пояс северо-западного простирания, конформный простиранию основных структур (Antonov, 2017).

В пределах пояса выделяются три "сегмента". В западной части выделяется две субпараллельные зоны северо-западного простирания, в пределах которых распределение даек и малых интрузий имеет очаговый характер с мерой устойчивости, достигающей "9" в локальных структурах. Восточнее дайки и малые интрузии образуют единый пояс с изрезанными границами и сложным внутренним строением. На этом отрезке, на юго-западном фланге Западно-Калбинской зоны, развит наиболее масштабный узел концентрации магматических образований с устойчивостью до "9", соответствующий, заключенному в зонах Чарского и Баладжальского разломов, Буконьско-Мариновскому поясу даек и малых интрузий, выделенному (Rafailovich, 2013). Восточнее этого узла магматические образования образуют фактически единую зонально-узловую систему.

В структуре описываемых образований отчетливо проявлена иерархичность и соподчиненность локальных очагов с высокой устойчивостью меры, которые "вложены" в области, менее насыщенные магматическими образованиями. По особенностям распределения устойчивости в границах локальных структур подчиненные структуры разделены на бимодальные (две локальные структуры на своде одной) и одномодальные, характеризующиеся постепенным нарастанием меры с одним экстремумом во внутренних частях.

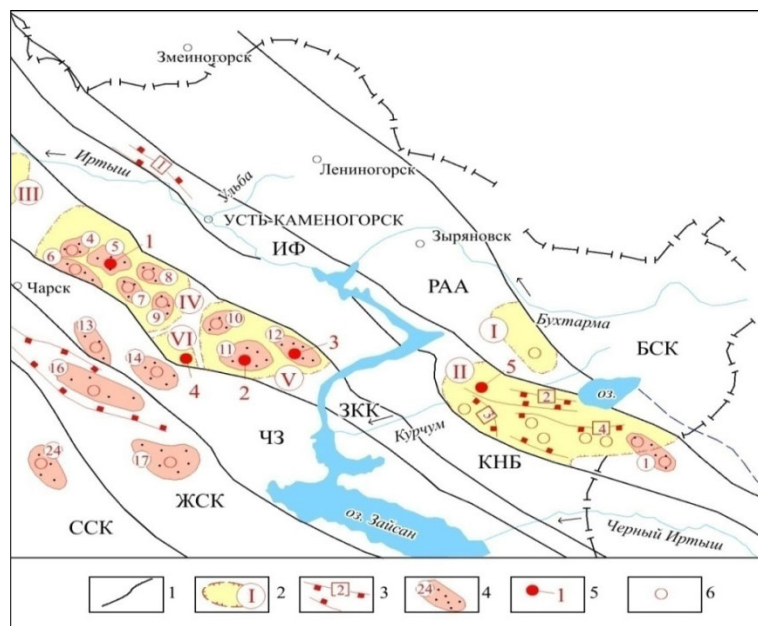


Рис. 1. Западно-Калбинский золоторудный пояс:

- 1 – границы структурных зон (БСК – Белоубинско-Сарымсакты-Куртинская; РАА – Рудноалтайско-Ашалинская; ИФ – Иртыш-Фуеньская; КНБ – Калба-Нарым-Бурчумская; ЗКК – Западно-Калба-Коксентауская; ЧЗ – Чарско-Зимунайская; ЖСК – Жарма-Саур-Харатунгская; ССК – Сиректас-Сарсазан-Кобукско-Эртайская);
- 2 – рудные районы; 3 – рудные зоны; 4 – рудные узлы; 5 – "эталонные" месторождения (1 – Бакырчик, 2 – Джумба, 3 – Кулуджун, 4 – Балажал, 5 – Маралиха); 6 – прочие золоторудные месторождения.
- Распределение золотого оруденения (СЗ): РАА: рудный район: I – Маймырский. ИФ: рудный район: II – Курчум-Кальджирский; рудные зоны: 1 – Полеваевско-Предгорненская, 2 – Лотошно-Маралихинская, 3 – Приреченско-Кыстав-Курчумская, 4 – Кальджир-Алкабекская; рудный узел: 1 – Манка-Долоносайский. ЗКК: рудные районы: III – Мукурский, IV – Бакырчикский, V – Кулуджунский, VI – Баладжальский; рудные узлы: 4 – Эспе, 5 – Бакырчик,
- 6 – Сарытау, 7 – Казан-Чункур, 8 – Канайка, 9 – Жантас, 11 – Джумба, 12 – Кулуджун. ЧЗ: рудные узлы: 13 – Аюжал-Боконский, 14 – Ашалы. ЖСК: рудная зона: 6 – Максут-Петропавловская; рудные узлы: 16 – Аргимбай, 17 – Арсеньевское. ССК: рудный узел: 24 – Ащису

Распределение "эталонных объектов" относительно описанной структуры даек и малых интрузий имеет закономерный характер. Так, месторождение Бакырчик локализовано в интервале меры 4, а Кызыловская зона (рассматриваемая автором как гигантская рудолокализирующая структура) охватывает интервалы меры от 4 до 7; при этом как месторождение Бакырчик, так и Кызыловская зона располагаются в сводовой части подчиненной очаговой структуры бимодального типа. Месторождение Балажал приурочено к градиентной зоне крупной бимодальной магматогенной структуры и охватывает интервалы значений меры 3, 4. Месторождение Жумба расположено в градиентной зоне и сводовой части бимодальной структуры с максимальным значением меры 6, его рудное поле охватывает интервал значений меры от 1 до 6.

Можно сделать вывод, что размещение эталонных объектов относительно структуры даек и малых интрузий подчинено только структурной закономерности, которая заключается в том, что все они приурочены к локальным диссипативным очаговым структурам, располагаясь либо в их сводовой части (Бакырчик, Жумба), либо в градиентной зоне (Баладжал, Жумба, Кулуджун) (рис. 2).

Таким образом, в пределах Западно-Калбинского золоторудного пояса произведена реконструкция магматогенно-рудных структур регионального уровня, позволявшая выделить перспективные площади ранга рудных узлов. Это дало возможность далее выделить перспективные площади ранга рудных полей.

Выделение перспективных площадей ранга рудных полей. На примере Жумбинской магматической рудной системы (МРС) произведена локализация перспективных площадей в категории рудных полей и месторождений. На основании исследований, с использованием

геологических материалов масштаба 1 : 200 000, в качестве рудогенерирующих факторов выделены структуры размещения малых интрузий разного состава и золоторудных объектов; в качестве рудоподводящих элементов – системы глубинных разломов, сутурные зоны и зоны смятия, выделенные по космогеологическим данным. Реконструкция МРС Жумбинского рудного поля в региональном плане позволила выделить локальные перспективные площади ранга рудных узлов.

Жумбинская рудная зона расположена на восточном фланге Западно-Калбинской зоны, (месторождения Жумба, Варяг, Федор-Ивановское и несколько рудопроявлений). Площадь сложена туфопесчаниками средней толщи серпуховского яруса с прослоями алевролитов. На поверхности магматические образования отсутствуют, результаты же интерпретации геофизических полей свидетельствуют о наличии не вскрытых интрузий гранитоидного состава (Korobeinikov, 2011). В пределах рудной зоны проявлены метасоматические образования (обохренность зоны окисления сульфидизированных пород и пиритизация). Кварцево-жильные тела компактно группируются в пяти узлах, с четырьмя из которых связаны известные месторождения золота (Жумба, Варяг, Федор-Ивановское, Свистун). На первом этапе проведены процедуры структурирования метасоматически измененных пород и кварцевожильных тел. Установлено, что размещение гидротермально-метасоматических образований и золоторудных месторождений в ней подчинено трем радиально ориентированным зонам, что подчеркивает ее глубинный очаговый характер (рис. 3, а). Наиболее обширный ареал метасоматически измененных пород фиксирует площадь гидротермально-рудной системы (рудного узла). Во внутренних частях всех "лучей" сформированы диссипативные

структуры с максимальными значениями меры устойчивости, что свидетельствует о наличии "центров" интенсивного проявления метасоматических процессов. В ядерной части структуры расположено наиболее масштабное поле кварцево-жильных образований. Известные месторождения и перспективные рудопроявления в структуре метасоматических образований локализованы в областях значений меры 4–6, площадь которых составляет 33 км² или 40,5 % от общей площади метасоматитов. Кварцево-жильные тела менее значительны.

Площадь их развития составляет 50,5 км². Они локализованы преимущественно во внутренних частях метасоматитов. Анализ геологического материала в совокупности с результатом статистических данных показывает, что все месторождения описываемой РМС локализованы на участках совместного устойчивого развития метасоматических образований и кварцево-жильных тел, что рассматривается в качестве мультипликативного показателя их размещения (рис. 3, а).

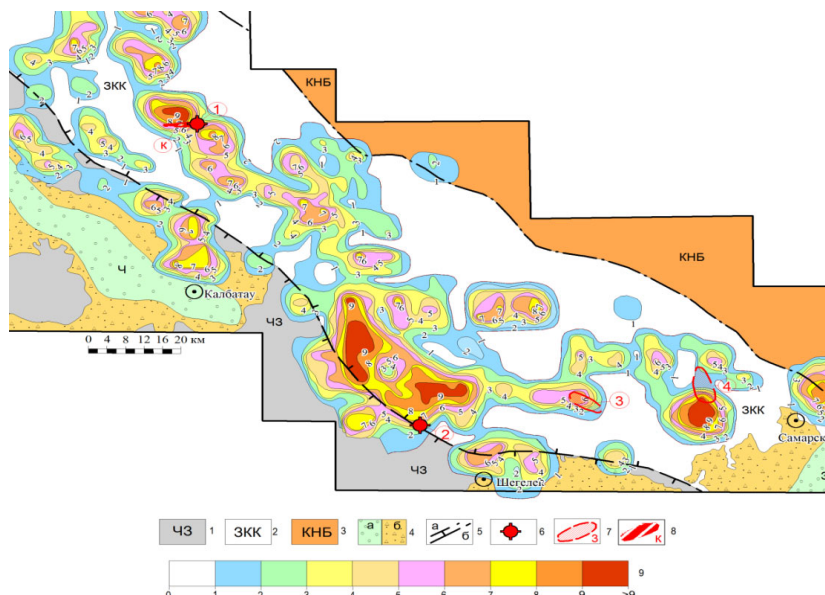


Рис. 2. Структура размещения даек и малых интрузий разного возраста, основного, среднего и кислого состава на площади Западно-Калбинского района и положение в ней "эталонных" месторождений (составила Г.Б. Оразбекова):

- 1–3 – структурные зоны: 1 – Чарско-Зимунайская, 2 – Западно-Калба-Коксентауская, 3 – Калба-Нарым-Бурчумская;
 4: а – неотектонические впадины длительного развития: 4 – Чарская, 3 – Зайсанская, б – покров пролювиальных отложений;
 5 – граничные глубинные разломы ЗКК: а – Теректинский, б – Чарско-Горностаевский;
 6 – эталонные золоторудные месторождения (1 – Бакырчик, 2 – Баладжал); 7 – золоторудные поля эталонных месторождений (3 – Жумбинское, 4 – Кулуджунское); 8 – Кызыловская зона (К);
 9 – интервалы значений меры устойчивости структуры даек и малых интрузий

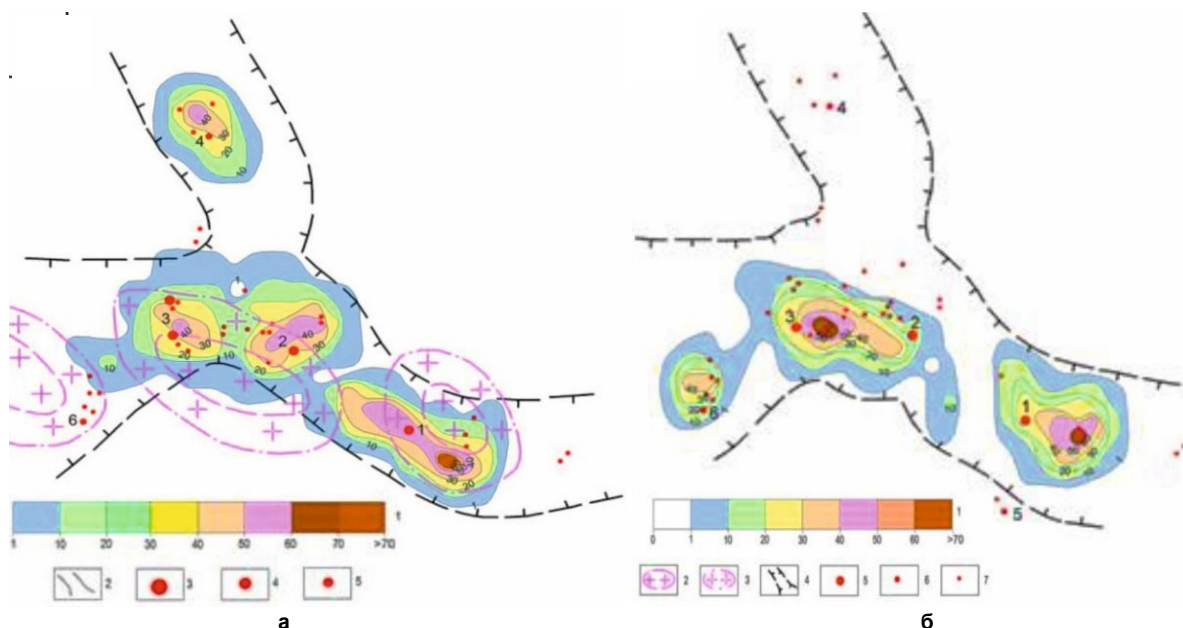


Рис. 3. Структуры совместного развития метасоматитов, кварцевых жил и скрытых интрузий:

- а – структура совместного развития кварцево-жильных тел и метасоматических образований на площади Жумбинской зоны:
 1 – интервалы значений меры устойчивости; 2 – экзоконтактовая область воздействия нескрытых интрузий гранитоидов, оконтуренная по значению "1" меры устойчивости; 3 – нескрытые интрузии гранитоидов по геофизическим данным;
 4 – границы гидротермально-рудной системы. б – структура совместного развития кварцево-жильных тел и интрузивных образований на площади Жумбинской зоны: 1 – интервалы значений меры устойчивости, выделенных по геофизическим данным;
 2 – границы магматогенно-рудной системы. Остальные условные обозначения – см. рис. 3, а

Площадь устойчивого совместного развития этих образований составляет 43,7 км² или 14,7 % от площади рудного узла. Анализ распределения золоторудных объектов разных масштабов показывает, что они локализованы в областях интервалов значения меры более 20, что составляет 13,5 км² или 30,9 % от площади совместного развития этих образований тел и соответственно 4,5 % от площади рудного узла.

Важным элементом модели рудоносной системы являются интрузивные образования.

Для оценки закономерности размещения рудных тел и гранитоидов рассчитана мера их устойчивой совместности (рис. 3, б). Наиболее масштабные золоторудные объекты, локализованные в областях интервалов значения меры более 20 (на площади 10,8 км²), были выделены как перспективные прогнозные участки. По результатам построений перспективы прогнозирования золоторудных объектов Жумбинской рудной зоны связаны с тремя площадями, каждая из которых рассматривается в ранге рудного поля (Жумбинская, Варяг-Федор-Ивановская и Новая в районе рудопроявления № 15 (рис. 3), на которых наиболее вероятно выявление нового золоторудного месторождения.

Выводы. Таким образом, по результатам исследований на региональном и локальном уровнях выявлены общие закономерности и принципы формирования РМС. В пределах Западно-Калбинского золоторудного пояса в результате реконструкции магматогенно-рудных структур регионального уровня, с применением методов системного анализа, были выделены перспективные площади ранга рудных узлов и рудных полей. На примере изучения Жумбинской рудной зоны реконструирована конкретная рудно-метасоматическая система в надинтрузивной зоне скрытого гранитоидного массива. Начальные этапы ее развития фиксируются обширными полями ороговикования, зонами пиритизации и ожелезнения вмещающих пород. Интенсивность проявления метасоматических процессов и кварцево-жильных тел неравномерная с образованием локальных узлов, вызванная обособленностью очагов рудоносных силикатных расплавов на заключительных этапах рудообразования. Локализация золотого оруденения происходила на всех стадиях формирования рудной системы, о чем свидетельствует наличие в рудах свободного золота и золота, связанного с сульфидами. В итоге исследования выделены перспективные площади в рангах рудных узлов для поиска новых золоторудных месторождений.

Список использованных источников

- Антонов, Ю.А. (2010). О некоторых структурно-литологических факторах контроля золотого оруденения месторождения Большевик в Восточном Казахстане. *Геология и охрана недр*, 2, 15–26.
- Антонов, Ю.А. (2017). Некоторые особенности локализации богатых руд месторождения Бакырчик (Восточный Казахстан). *Геология и охрана недр*, 2(63), 16–25.
- Беспяев, Х.А., Любецкий, В.Н., Любецкая, Л.Д., Муканова, А.Е. (2013). Особенности металлогении Западно-Калбинского золоторудного пояса. *Известия НАН РК, серия геологии и технических наук*, 5, 13–20.
- Васильев, С.В. (1990). Прогнозирование на основе системно-информационного подхода. *Компьютерный прогноз месторождений полезных ископаемых*, 208–225.
- Коробейников, А.Ф. (2011). Научные основы прогнозно-минералогических и поисковых исследований на благороднометалльное оруденение. *Известия Томского политехнического университета*, 318, 1, 14–22.
- Летников, Ф. (1992). Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука.
- Лось, В.Л. (2015). Проблемы и задачи прогнозирования рудных объектов. *Геология и охрана недр*, 2(55), 66–75.
- Михайлов, В.А. (2019). Рудно-магматична система Sukumaland (Танзанія). *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1(84), 34–41.
- Михайлов, В.А., Тоц, А. (2018). Новый Золоторудный район в Танзании. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 3(82), 55–59.

Наумов, Е.А., Калинин, Ю.А., Ковалев, К.Р. и др. (2014). Золоторудные месторождения Восточного Казахстана в углеродистых терригенно-карбонатных комплексах и их изотопно-геохронологические характеристики. Гигантские месторождения золота Центральной Азии. Укрепление золоторудного потенциала Казахстана. *Материалы Международного симпозиума, Алматы*, 123–129.

Панкратова, Н.Л., Павлова, З.Н., Степаненко, Н.И. (2012). Золотоносные углеродистые тектоносланцы и перспективы Кулджунского рудного поля (Западная Калба). *Науки о Земле в Казахстане. МГК-34*, 270–280.

Рафаилович, М.С. (2013). Геология золота Центральной Азии: эволюция оруденения, метасоматические формации, эксплозивные брекчии. Алматы.

Третьяков, А.В. (2009). Формирование, закономерности размещения и перспективы россыпной золотоносности Востока Казахстана. Алматы.

Chekalin, V. M., D'yachkov, B. A. (2013). Rudny Altai base-metal belt: Localization of massive sulfide mineralization. *Geology of ore deposits*, 55, 6, 438–454.

Dolgoplova, A., Seltmann, R. et al. (2015). Mineralogical and Geochemical Characteristics of the Vasilkovskoye Gold Deposit (North Kazakhstan). *Mineral resources in a sustainable world*, 1–5, 77–80.

Mizernaya, M., Dyachkov, B., Miroshnikova, A. et al. (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.

Mizernaya, M., Seltmann, R., Miroshnikova, M. et al. (2018). Geological and geochemical models of gold stockwork deposits in intrusive plutons of north and East Kazakhstan. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan-series of geology and technical sciences*, 2, 134–140.

Rafailovich, M. (2009). Gold deposits of Kazakhstan: geology, metallogeny, exploration models. *Almaty*.

References

- Antonov, Yu.A. (2010). About some structural-lithologic factors of gold ore control at Bolshhevik deposit in East Kazakhstan. *Geologiya i ohrana nedr*, 2, 15–26. [in Russian]
- Antonov, Yu.A. (2017). Some peculiarities of rich ores localization at Bakyrchik deposit (East Kazakhstan). *Geologiya i ohrana nedr*, 2(63), 16–25. [in Russian]
- Bespaev, Kh.A., Lyubetsky, V.N., Lyubetskaya, L.D., Mukanova, A.E. (2013). Peculiarities of metallogeny of West-Kalba gold ore belt. *News of NAS RK, geology and technical sciences series*, 5, 13–20.
- Chekalin, V.M., D'yachkov, B.A. (2013). Rudny Altai base-metal belt: Localization of massive sulfide mineralization. *Geology of ore deposits*, 55, 6, 438–454.
- Dolgoplova, A., Seltmann, R. et al. (2015). Mineralogical and Geochemical Characteristics of the Vasilkovskoye Gold Deposit (North Kazakhstan). *Mineral resources in a sustainable world*, 1–5, 77–80.
- Korobeynikov, A.F. (2011). Scientific basis of prognostic-mineralogical and prospect-level surveys on precious metal ore. *News of Tomsk polytechnic university*, 318, 1, 14–22. [in Russian]
- Letnikov, F.A. (1992). Synergetics of geological systems. *Novosibirsk: Nauka*. [in Russian]
- Los, V.L. (2015). Problems and aims of ore objects forecasting. *Geologiya i ohrana nedr*, 2 (55), 66–75. [in Russian]
- Mizernaya, M., Dyachkov, B., Miroshnikova, A. et al. (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.
- Mizernaya, M.A., Seltmann, R., Miroshnikova, M.P. et al. (2018). Geological and geochemical models of gold stockwork deposits in intrusive plutons of north and East Kazakhstan. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan-series of geology and technical sciences*, 2, 134–140.
- Mykhailov, V. (2019). Ore – magmatic system Sukumaland (Tanzania). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(84), 34–41.
- Mykhailov, V., Tots, A. (2018). A new gold ore region in Tanzania. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(82), 55–59.
- Naumov, E.A., Kalinin, Yu.A., Kovalev, K.R. et al. (2014). Gold ore deposits of East Kazakhstan in carbonic terrigenous-carbonate complexes and their isotopic-geochronological characteristics. Giant fields of Central Asian gold. *Materials of international symposium*, *Almaty*, 123–129. [in Russian]
- Pankratova, N.L., Pavlova, Z.N., Stepanenko, N.I. (2012). Gold-bearing carbonic tectonoshales and potential of Kuldzhun ore field (West Kalba). *Earth sciences in Kazakhstan. MGK-34*, 270–280. [in Russian]
- Rafailovich, M.S. (2009). Gold deposits of Kazakhstan: geology, metallogeny, exploration models. *Almaty*.
- Rafailovich, M.S. (2013). Geology of Central Asian gold: ore evolution, metasomatic formations, explosive breccia. *Almaty*. [in Russian]
- Tretyakov, A.V. (2009). Formation, location regularities, and potential of alluvial gold mineralization of East Kazakhstan. *Almaty*. [in Russian]
- Vasilyev, S.V. (1990). Forecasting based on system-informational approach. Computer projections of mineral deposits. M.: Nedra, pp. 208–225. [in Russian]

Надійшла до редакції 01.06.2020

M. Mizernaya, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.,
E-mail: mizernaya58@bk.ru;
G. Orazbekova, PhD, Assoc. Prof.,
E-mail: orazbekova@bk.ru;
Department of Geology and Mining,
East Kazakhstan State Technical University named after D. Serikbayev;
B. Dyachkov, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Academician of the NSA of RK, Prof.,
E-mail: bdyachkov@mail.ru;
LLP "Altaiskiy Geologic-Ecological Institute", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan;
A. Miroshnicova, PhD,
E-mail: anastasiya-2588@mail.ru;
Department of the National Center of Complex Processing of Mineral's raw materials, "VNII tsvetmet",
1 Promishlennaya Str., Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan;
V. Zatskovnyi, Dr. Sci. (Tech.),
E-mail: vitallii.zatskovnyi@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasilkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

MODELING OF ORE-MAGMATIC SYSTEM OF GOLD DEPOSITS IN EASTERN KAZAKHSTAN

The article is devoted to the results of using system-defined geological modeling for forecasting gold deposits on the territory of the oldest gold mining region in the Republic of Kazakhstan – the West Kalba gold belt (East Kazakhstan). Research is aimed at developing forecast criteria and searches for new ore objects in favorable geological structures. The main attention of the conducted research was focused on a system-defined analysis of geological factors, the interaction of which provides a synergy effect and reveals the patterns of formation of gold ore objects. To solve this problem, the authors made a quantitative assessment of the development sustainability of the ore-generating elements of the system according to S.V. Vasiliev methodology.

A quantitative assessment of the stability of individual factors and their interaction made it possible to assess the qualitative state of individual sections and define the natural boundaries of the areas of the corresponding hierarchical level, promising for the search of certain mineral deposits.

The specific work was carried out to define the areas promising for the search of deposits based on a quantitative assessment of the individual factors stability. Using geological materials, results of geophysical work, space-geological data, the localization of promising areas within the West Kalba structural-formation zone and the Zhumba ore-magmatic system in East Kazakhstan was done.

Keywords: ore-magmatic system, gold, deposit, assessment of the geological factors stability.

М. Мізерна, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: mizernaya58@bk.ru;
Г. Оразбекова, PhD, доц.,
E-mail: orazbekova@bk.ru;
Східно-Казахстанський державний технічний університет ім. Д. Серікбаєва,
вул. Серікбаєва, 19, м. Усть-Каменогорськ, 070004, Казахстан;
Б. Д'ячков, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: bdyachkov@mail.ru;
ТОО "Алтайський геолого-екологічний інститут", м. Усть-Каменогорськ, Казахстан;
А. Мірошникова, PhD,
E-mail: anastasiya-2588@mail.ru;
Філіал РГП "НЦ КПМС РК" "ВНІІцветмет"
вул. Промислова, 1, м. Усть-Каменогорськ, 070004, Казахстан;
В. Зацковський, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: vitallii.zatskovnyi@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ МАГМАТОГЕННИХ РУДНИХ СИСТЕМ ЗОЛОТОРУДНИХ РОДОВИЩ СХІДНОГО КАЗАХСТАНУ

Присвячено результатам використання системного геологічного моделювання при прогнозуванні золоторудних родовищ на території найстарішого району видобутку золота в Республіці Казахстан – Західно-Калбінського золоторудного поясу (Східний Казахстан). Дослідження спрямовані на розробку критеріїв прогнозу і пошуку нових рудних об'єктів у сприятливих геологічних структурах. Головна увага при проведенні досліджень була приділена системному аналізу геологічних факторів, взаємодія яких забезпечує синергетичний ефект і виявлення закономірностей формування золоторудних об'єктів. Для розв'язку цієї задачі авторами здійснена кількісна оцінка стійкості розвитку рудогенеруючих елементів системи за методикою С.В. Васильєва.

Кількісна оцінка стійкості окремих факторів та їхньої взаємодії дозволили оцінити якісний стан окремих ділянок і визначити природні границі площ відповідного ієрархічного рівня, перспективних на пошуки родовищ певної корисної копалини.

Були виконані роботи з виділення площ, перспективних на пошуки родовищ, на основі кількісної оцінки стійкості окремих факторів. З використанням геологічних матеріалів, результатів геофізичних робіт, космогеологічних даних проведено локалізацію перспективних площ у межах Західно-Калбінської структурно-формаційної зони і Жумбінської рудно-магматичної системи у Східному Казахстані.

Ключові слова: рудно-магматична система, золото, родовище, оцінка стійкості геологічних факторів.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 504.064.3:(556.5:628.542)(477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08>

О. Азімов¹, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,
пров. наук. співроб., E-mail: azimov@casre.kiev.ua;
І. Кураєва², д-р геол. наук, проф.,
E-mail: ki4412674@gmail.com;
О. Трофимчук³, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України,
E-mail: itelua@kv.ukrtel.net;
К. Злобіна², канд. геол. наук, наук. співроб.,
E-mail: ecaterinka@ukr.net;
С. Кармазиненко⁴, канд. геогр. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: karmazinenko78@gmail.com;
¹Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України
вул. О. Гончара, 55, б, м. Київ, 01054, Україна;
²Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України
пр. Акад. Палладіна, 34, м. Київ, 03680, Україна;
³Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
б-р Чоколівський, 13, м. Київ, 03186, Україна;
⁴Інститут географії НАН України,
вул. Володимирська, 44, м. Київ, 01030, Україна

МОНІТОРИНГОВА ОЦІНКА ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД У РАЙОНАХ ЗАХОРОНЕННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О.Л. Шевченком)

У північно-західній частині Київського полігону № 5 захоронення твердих побутових відходів та у прилеглому до неї районі проведено моніторингові еколого-гідрогеохімічні дослідження поверхневих вод. На підставі аналізу відібраних з наявних водойм проб поверхневих вод полігону виявлено забруднення їх стічними водами з великим вмістом насамперед органічних токсикантів. Вірогідно, останні надходять або з карт і ставків-фільтратонакопичувачів полігону, або зі свиноферми, що розташована неподалік від нього, і до того ж гіпсометрично вище по поверхні рельєфу. Для конкретизації відповіді необхідними є додаткові дослідження.

Натомість поверхневі води поза територією полігону характеризуються еколого-гідрогеохімічними показниками, що не перевищують гранично допустимі концентрації, однак вони вище фонових значень. Це свідчить про те, що істотною виносу хімічних забруднювачів з поверхневими водами з території північно-західної частини полігону № 5 за його межі протягом періоду більше пів року немає. Лише короткоперіодичний моніторинг водних об'єктів території здатен установити ті часові інтервали в межах пів року, коли може відбуватися забруднення вод різноманітними токсикантами.

Ключові слова: полігон, побутові відходи, токсиканти, поверхневі води, геохімічний аналіз.

Постановка загального завдання. Вивчення еколого-геохімічного стану об'єктів довкілля територій, що перебувають під впливом різноманітних викидів, пов'язаних із твердими побутовими відходами (ТПВ), сьогодні є дуже актуальним (Стан сфери..., 2019). Це аргументується тим, що наслідки впливу полігонів ТПВ на навколишнє середовище і на здоров'я населення, що живе поблизу цих територій, викликають серйозні побоювання (Горох, 2005; Буц та Некос, 2012; Ohwoghere and Aweto, 2013; Ali et al., 2014; Baum et al., 2014; Abd El-Salam and Abu-Zuid, 2015; Самойлік та Молчанова, 2017; Chadar S.N. and Chadar K., 2017; Азімов та ін., 2018, а, б; Azimov et al., 2018; Postacchini et al., 2018; Azimov u др., 2019; Azimov et al., 2019, а, б; Kaliaskarova et al., 2019 та ін.).

Найбільшого забруднення зазнають підземні та поверхневі води, ґрунти і поверхневі відклади, рослинність. Особливу небезпеку в цьому процесі становить фільтрат, який являє собою складну за хімічним складом рідину з яскраво вираженим неприємним запахом біогазу. Він утворюється із стічних вод, що виникають у результаті інфільтрації атмосферних опадів у "тіло", власне звалища сміття, а потім концентруються в його основі. При цьому, проходячи через товщу відходів, фільтрат збагачується різноманітними токсичними речовинами, що входять до їхнього складу, або ж насичується продуктами їхнього розкладання. У межах сміттєзвалищ, закладених без дотримання правил охорони довкілля (напр. таких, що не мають протифільтраційних екранів, системи відведення і очищення фільтрату тощо), фільтрат зазвичай вільно стікає по рельєфу в напрямку понижених ділянок, і, як наслідок, потрапляє в ґрунт і підстилаючі його осадові утворення,

поверхневі води гідрографічної мережі, донні відклади, ґрунтові й підземні води.

Комплексні дослідження природних утворень, прилеглих до таких полігонів, необхідні для їхньої об'єктивної еколого-геохімічної оцінки. Геохімічні процеси, які відбуваються на таких територіях, призводять до значної трансформації екологічного стану поверхневих відкладів, природних вод, біогеохімічних показників тощо.

Таким чином, основна мета досліджень полягає в оцінці впливу фільтрату (на прикладі території **Київського полігону № 5** захоронення ТПВ), що, імовірно, надходить із карт полігону, на якість поверхневих вод водойм, як в його межах, так і на прилеглих ділянках. Нині на полігоні захоронено близько 7 млн т ТПВ. За роки експлуатації висота сміттевого шару в його межах піднялася до 50 м, що приблизно дорівнює висоті 15-поверхового будинку.

Попередні наші дослідження (Азімов та ін., 2018, а, б, 2019; Azimov et al., 2018, 2019, б) стосувалися поверхневих вод, відібраних у травні 2018 р. у межах низовинної, порізаної меліоративними каналами рівнини, яка прилягає до північно-східної частини полігону № 5. На підставі гідрогеохімічного аналізу відповідних проб установлено, що вміст у них переважної більшості досліджених елементів не перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК), хоч він і вище фонових значень (Никитин у др., 1990). Тобто за своїми еколого-гідрогеохімічними показниками поверхневі води цього району є достатньо задовільними. Це може свідчити про незначний вплив полігону на їхній стан або ж про відсутність такого впливу загалом, принаймні протягом певного періоду, що передував етапу відбору зразків води.

У цій публікації висвітлено результати гідрогеохімічного аналізу проб поверхневих вод, відібраних у листопаді 2018 р. (Azimov та ін., 2019; Azimov et al., 2019, b) та у червні 2019 р. (Azimov et al., 2019, a) у північно-західній частині полігону № 5 і на прилеглих до неї площах. При цьому два водні об'єкти з метою дослідження їх у моніторинговому режимі опробувалися в 2018 і 2019 рр. Із залученням ряду інших водойм їх планується вивчати і в подальшому. Це дозволить установити зміни як поверхневі води цього району із часом.

Методика досліджень. На зазначеній території проби поверхневої води відібрано в натурних умовах у межах чотирьох майданчиків спостережень у ході **польових досліджень** уздовж **поперечно-поздовжнього профілю** (рис. 1). Зокрема, 16 листопада 2018 р. з водойм було відібрано зразки в межах трьох площадок спостережень (площадки спостережень № 1–3). При цьому площадки № 1 і 2 розташовані безпосередньо на території полігону (у контурі офіційно відведеної під нього площі), а № 3 – у межах фоновної ділянки, але такої, що, імовірно, зазнає дії впливу існування і діяльності полігону. 5 червня 2019 р. проби поверхневої води відібрано теж на трьох площадках спостережень: № 2 і 3, а також на додатковій площадці № 4, розташованій у межах фону.

При цьому географічна прив'язка площадок спостережень здійснювалася із застосуванням приладу GPS MAP 60 CSX з точністю прив'язки 5 м у системі координат UTM/WGS 84. Зразки води об'ємом 1,5 л кожна відібрано відповідно до вимог ГОСТ Р 51592-2000 (Вода. Общие требования к отбору проб, 2000). Наступний етап роботи полягав у лабораторно-камеральному гідрогеохімічному їхньому аналізі та відповідній інтерпретації екологічного спрямування.

Площадка спостережень № 1 закладена у днищі балки біля її західного, крутого схилу (з кутами падіння близько 45–50°), уздовж якого спостерігається тимчасовий струмок у рівчаку з напрямком течії на північ. Ця балка із заходу і північного-заходу обмежує розлогу вододільну поверхню, на якій розміщені черга "Б" полігону № 5 та його основний ставок-фільтратонакопичувач (рис. 1). Саме із тимчасового струмка було взято зразки поверхневої води.

Площадка спостережень № 2 розташована в районі дамби, що перегороджує місце з'єднання заповненої водоймою балки (в її днищі гіпсометрично вище розташована площадка спостережень № 1) та обмежувальної заболоченої долини Ходосівської балки урочища Марусин Яр з наявною тут річкою, яка з півночі окреслює вододільну поверхню з розміщеною на ній картою "А" полігону № 5 (рис. 1; див. рис. 3 в Azimov et al., 2019, b). Дамба перегороджує штучний ставок, що утворився у нижній частині балки і який простягається у південно-західному напрямку до її верхів'я. Проби поверхневої води відібрано зі штучного ставка безпосередньо біля дамби.

Площадку спостережень № 3 закладено в 1 км від північно-західного контуру полігону № 5, тобто фактично вже в межах фоновної ділянки (рис. 1, 2). У районі площадки наявна нижня частина описаної вище обмежувальної долини р. Марусин Яр, яка в цьому місці має північ-північно-західне простягання і з'єднується з іншою, майже поперечною до неї основною долиною, що тягнеться північніше с. Креничі. Долина Марусинового Яру в цьому місці є розлогою за своєю шириною, пласкою, заболоченою, порослою очеретом. У районі з'єднання цих долин через тунель під автодорогою с. Креничі – с. Ходосівка з водойми Марусинового Яру взято зразки поверхневої води.

Площадка спостережень № 4 розташована неподалік площадки спостережень № 3 на північному березі штучного ставка, що утворився внаслідок підпору насипом автодороги с. Креничі – с. Ходосівка. Ставок відноситься до основної долини території, яка у схід-північно-

східному напрямку простягається північніше с. Креничі. Більша частина поверхні ставка покрита рясною водною рослинністю. Площадка розміщена поблизу зазначеної автодороги (рис. 1, 3). Зразки поверхневої води відібрано саме зі ставка.

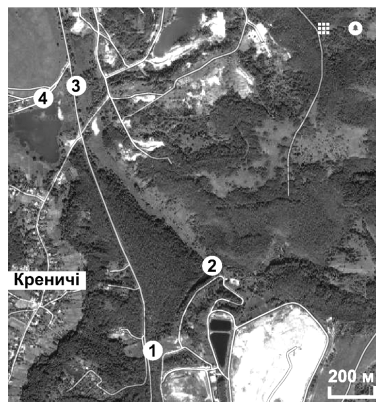


Рис. 1. Картосхема розташування площадок спостережень у зоні впливу північно-західної частини полігону № 5. Як підложка використано космічний знімок, отриманий з Інтернет-джерела (<https://www.google.com/maps>)



Рис. 2. Фотографічне зображення місця з'єднання через тунель під автодорогою с. Креничі – с. Ходосівка нижньої частини долини р. Марусин Яр з простягнутою північніше с. Креничі долиною (район площадки спостережень № 3)



Рис. 3. Фотографічне зображення ставка в межах основної долини, що тягнеться північніше с. Креничі (район площадки спостережень № 4)

Лабораторні дослідження. Для еколого-геохімічних досліджень поверхневих вод використано *фізико-хімічні методи* аналізів. Зокрема, застосовано метод мас-спектрометрії з індукційно зв'язаною плазмою (ICP-MS аналіз). Докладніше особливості проведення цього типу робіт висвітлено нами в попередній публікації (Azimov et al., 2018).

Результати досліджень та їхній аналіз. Результати досліджень відібраних проб поверхневої води передусім представимо в табличній формі по кожній із площадок спостережень, окремо по етапах робіт 2018 р. та 2019 р. (табл. 1), після чого проаналізуємо визначені основні еколого-гідрогеохімічні її показники.

Дослідженнями встановлено, що проаналізовані води в межах площадок спостережень № 3 і 4 за хімічним складом належать до гідрокарбонатно-кальцієвого та гідрокарбонатно-змішаного, а в межах площадок № 1 та 2 – до гідрокарбонатно-хлоридно-натрієвого типу.

Таблиця 1

Результати хімічного аналізу зразків поверхневої води, відібраних у межах північно-західної частини полігону № 5, а також у прилеглих до неї районах

Показник, мг/дм ³	№ площадки спостережень і дата відбору проб						ГДК, мг/дм ³
	у межах полігону			за межами полігону			
	№ 1, тимчасовий струмок у балці	№ 2, ставок		№ 3, ставок біля з'єднувального тунелю		№ 4, ставок північніше с. Креничі	
		16.11.2018	16.11.2018	05.06.2019	16.11.2018	05.06.2019	
Na ⁺ +K ⁺			155,48		14,95	54,28	200 (Na ⁺)
Ca ²⁺	236,47	116,23	82,16	48,1	62,12	56,11	130
Mg ²⁺	45,56	27,97	24,32	23,14	37,7	26,75	80
Fe _{заг.}	3,3	6,82	1,73	0,42	0,47	0,44	0,2
HCO ₃ ⁻			494,1	366	372,1	353,8	
Cl ⁻	967,87	477,12	161,9	5,45	34	34	250
SO ₄ ²⁻	38,4	19,2	9,6	48	38	28,8	500
NO ₃ ⁻	98,3	10,8	6,2	3,1	10,31	2,0	45
сухий залишок	3020	1709	638	333	376,8	288,4	1000
жорсткість, мг-екв /дм ³	18,8	10,4	6,1	6,12	6,2	5	7

Примітка: жирним шрифтом указано значення, що перевищують ГДК

Нижче окремо охарактеризуємо результати еколого-гідрогеохімічних показників проб поверхневої води, що відібрані безпосередньо на території полігону № 5, а також поза його межами. Так, відібрані **в межах полігону** (рис. 1) з площадки спостережень № 2 проби мають чорний колір, сильний неприємний запах органіки, яка розкладається. Вода зразків, відібраних на площадці спостережень № 1 – коричнева, характеризується слабким запахом.

Зазначеним пробам від 16.11.2018 притаманні високі показники загальної лужності, сухого залишку, вмісту хлоридів і нітратів. Так, у зразках з площадок спостережень № 1 і 2 вміст хлоридів перевищує ГДК для поверхневих вод у 3,9 і 1,9 рази відповідно (*Никитин і др., 1990*). За вмістом нітратів проби площадки спостережень № 1 перевищують ГДК приблизно у 2,2 рази. Вірогідно, це зумовлено тим, що опробовані водойми значною мірою являють собою стічні води з великим вмістом органічних забруднювачів. Останні, скоріш за все, належать до гумінових та інших органічних кислот. Тому для отримання більш коректних показників хімічного складу таких типів води необхідна попередня їхня очистка за спеціальною технологією.

Тобто поверхневі води, які накопичуються у балці, що із заходу і північного-заходу обмежує розлогу вододільну поверхню, на якій розміщені черга "Б" полігону № 5 та його основний ставок-фільтратонакопичувач, як в її верхів'ї (струмок у рівчаку, площадка спостережень № 1), так і в районі її злиття (впадіння) з урочищем Марусин Яр, перегороженого дамбою з утворенням штучного ставка (площадка спостережень № 5), відносно інтенсивно забруднюються відповідними токсикантами. Вони можуть надходити з двох можливих джерел: 1) з території полігону № 5; 2) зі свиноферми на десь 2 тис. голів свиней, що розташована південніше полігону, проте гіпсометрично по поверхні рельєфу вище (тут щодня виробляються органічні відходи, які, вочевидь, скидаються у вигрібні ями). Для конкретизації відповіді необхідно додаткові дослідження.

Імовірно, це масоперенесення відбувається природними шляхами з огляду на ландшафтно-геологічні умови території та взаєморозташування зазначених об'єктів. У будь-якому випадку, на наш погляд, найбільша динаміка процесу забруднення, вірогідно, має місце після рясних атмосферних опадів (переважно злив) і швидкоплинного танення значних масивів снігового покриву.

Разом із тим, звертає на себе увагу зменшення концентрації хлоридів у понад 2,9 рази у пробах поверхневих вод зі ставка в межах полігону (площадка спостережень № 2) з аномальних 477,12 мг/дм³ (зразки від 16.11.2018) до 161,9 мг/дм³ (зразки від 05.06.2019),

що вже не перевищують ГДК. У разі, якщо відповідні забруднювачі ще в кінці 2018 р. потрапляли до ставка саме з об'єктів полігону № 5, а в середині 2019 р. їхні обсяги значно зменшилися, то можна зробити такий висновок. Німецьке обладнання із системою переробки (очищення) токсичного фільтрату "ROCHEM", яке базується на технології зворотного осмосу і працює на полігоні, функціонує задовільно протягом періоду, що безпосередньо передував нашим дослідженням у червні 2019 р. Очевидно, що після збільшення потужності системи із 200 до 350 м³/добу рідина, яка залишалася після очищення фільтрату і розпилення її по площі полігону, за відсутності рясних атмосферних опадів лише в незначній кількості розтікалася по окрузі й до поверхневих вод довіклія майже не потрапляла.

Або ж навпаки: саме через інтенсивні зливи другої половини травня – початку червня 2019 р. вода у ставку на полігоні (площадка спостережень № 2) станом на 5 червня була істотно розбавлена відносно чистими дощовими водами. Особливо тими, що стікали з крутого західного схилу балки, незайманого ТПВ.

Також еколого-геохімічними дослідженнями визначено, що в зразках поверхневої води від 16.11.2018 з площадки спостережень № 1 у межах полігону вміст кальцію перевищує ГДК для питних вод майже в 1,8 рази. А вміст Fe_{заг.} перевищує ГДК для питних вод (*Никитин і др., 1990*) у всіх відібраних пробах чотирьох площадок спостережень, як у межах полігону № 5 (16,5 рази – площадка спостережень № 1; 34,1 рази – площадка спостережень № 2), так і на фонових ділянках (2,35 та 2,2 рази на площадках спостережень № 3 і 4 відповідно). Вочевидь, стосовно Fe_{заг.} поверхневі води всього регіону досліджень характеризуються підвищеним вмістом цього елемента.

Натомість проби поверхневої води, відібрані з площадок спостережень № 3 і 4 в 1 км від північно-західного контуру полігону № 5 (тобто **за територією полігону**, фактично в межах фону, див. рис. 1), є світлими, практично без запаху. За винятком Fe_{заг.} її еколого-гідрогеохімічні показники не перевищують ГДК (*Никитин і др., 1990*). Таким чином, значного виносу хімічних забруднювачів з поверхневими водами за межі полігону в північно-західній його частині не встановлено. Лише короткоперіодичний моніторинг водних об'єктів території здатен у перспективі встановити конкретні часові інтервали в межах тієї чи іншої пори року, коли може відбуватися забруднення вод різноманітними токсикантами.

Висновки і перспективи подальших робіт. Отже, еколого-гідрогеохімічними дослідженнями зразків поверхневих вод, відібраних у північно-західній частині Київського полігону № 5 захоронення ТПВ, виявлено забруднення

водойм стічними водами з великим вмістом насамперед органічних токсикантів. Вірогідно, останні надходять або з карт і ставків-фільтратонакопичувачів полігону, або з розташованої неподалік від нього свиноферми.

Натомість поверхневі води поза територією полігону, у прилеглому до його північно-західної частини районі, характеризуються еколого-гідрогеохімічними показниками, що не перевищують ГДК. Однак вони вище фонових значень. Це свідчить про те, що істотного виносу хімічних поллютантів з поверхневими водами з території північно-західної частини полігону за його межі протягом періоду більше пів року немає.

У подальшому необхідно розширити список мікроеlementів і визначити їхній вміст у відібраних зразках води. Важливим показником якості поверхневих вод також буде дослідження концентрацій металів (зокрема важких) у сухому залишку наявних проб.

Вважаємо, що лише завдяки короткоперіодичному моніторингу водних об'єктів території можливо у перспективі виявляти конкретні часові інтервали в межах тієї чи іншої пори протягом року, коли може відбуватися забруднення вод різноманітними токсикантами.

Список використаних джерел

- Азімов, О.Т., Кураєва, І.В., Войтюк, Ю.Ю., Самчук, А.І., Кармазине-нко, С.П., Бахмутів, В.Г. (2018а). Еколого-геохімічна оцінка об'єктів до-вкілля територій поховання твердих побутових відходів. *Пошукова та екологічна геохімія*, 1 (19), 22–26.
- Азімов, О.Т., Томченко, О.В., Кармазине-нко, С.П., Кураєва, І.В., Войтюк, Ю.Ю. (2018б). Моніторинг територій полігонів твердих побу-тових відходів з використанням дистанційних технологій. *Формування про-грам щодо поводження з відходами для об'єднаних територіальних гро-мад: проблемні питання та кращі практики: Зб. матеріалів Націо-нального форуму "Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології", Київ, 22-23 листопада 2018 р. Київ: Центр еко-логічної освіти та інформації*, 84–87.
- Азімов, О.Т., Трофимчук, О.М., Кураєва, І.В., Кармазине-нко, С.П. (2019). Оцінка вмісту важких металів у ґрунтах та інших компонентах ландшафту в районах заховання твердих побутових відходів. *Еколо-гічна безпека та природокористування*, 2 (30), 5–17.
- Бущ, Ю.В., Некос, А.Н. (2012). До питання екологічної небезпеки поліго-нів твердих побутових відходів для компонентів геосистем (на прикладі до-сліджень щодо концентрацій важких металів у складових геосистем). *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії: Зб. наук. пр. Харків: Харків. нац. ун-т ім. В.Н. Каразіна*, 16, 22–25. Отримано 6 вересня, 2019, із http://goik.univer.kharkov.ua/wp-content/files/issue_16/16_7.pdf
- Вода. Общие требования к отбору проб: Государственный стандарт РФ ГОСТ Р 51592-2000. (2000). (принят и введен в действие постанов-лением Госстандарта РФ от 21 апреля 2000 г. № 117-ст.). [Дата введе-ния 1 июля 2001 г.]. Москва: Изд-во Госстандарт.
- Горох, Н.П. (2005). Экологическая оценка вредных веществ при ком-плексной утилизации муниципальных отходов. *Коммунальное хозяйс-тво городов: Науч.-техн. сб.* Харьков: Харьков. нац. ун-т городского хозяйс-тва им. А.Н. Бекетова, 63, 172–181. Отримано 6 вересня, 2019, із <https://eprints.kname.edu.ua/2155/>
- Никитин, Д.П., Новиков, Ю.В., Рощин, А.В., Жилов, Ю.Д., Марченко, Д.Г., Ясинский, А.А. (1990). Справочник помощника санитарного врача и помо-щника эпидемиолога. Под ред. Д.П. Никитина, А.И. Заиченко. Москва: Медицина.
- Самойлік, М.С., Молчанова, А.В. (2017). Екологічні аспекти впливу поліго-нів твердих побутових відходів на навколишнє середовище. *Фільтрат. Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 1-2, 88–91. Отримано 6 вересня, 2019, із <http://journals.pdaa.edu.ua/visnyk/article/view/86/120>
- Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2018 рік. (2019). Київ: Мінрегіонбуд України. Отримано 25 березня, 2019, із http://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/teretory/stan-sferi-povodzhennya-z-pobutovimi-vidhodami-v-ukrayini-za-2018-rik/?fbclid=IwAR1o8-GKuiH_3jPkv8Xa089vdJVRR2W6MEePun-rjTMN124pNLdrcoulr7Q
- Abd El-Salam, M.M., Abu-Zuid, G.I. (2015). Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt. *Journal of Advanced Research*, 6, 4, 579–586. Retrieved September 6, 2019, from <https://doi.org/10.1016/j.jare.2014.02.003>
- Ali, S.M., Pervaiz, A., Afzal, B., Hamid, N., Yasmin, A. (2014). Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites of Islamabad city. *Journal of King Saud University – Science*, 26, 1, 59–65. Retrieved September 6, 2019, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364713000517>
- Azimov, O.T., Bakmutov, V.G., Voytyuk, Yu.Yu., Dorofey, Ye.M., Karmazynenko, S.P., Kuraeva, I.V. (2018). Reconnaissance integrated geoeological study of the disposal region for municipal solid waste with the aim of environmental assessment. *12th International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13-16 November, Kyiv, Ukraine, Conference Paper. doi: 10.3997/2214-4609.201803142.
- Azimov, O.T., Dorofey, Ye.M., Trofymchuk, O.M., Kuraeva, I.V., Zlobina, K.S., Karmazynenko, S.P. (2019a). Monitoring and assessment of impact of municipal solid waste landfills on the surface water quality in the adjacent ponds. *13th International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 12-15 November, Kyiv, Ukraine, Conference Paper. doi: 10.3997/2214-4609.201903228.
- Azimov, O.T., Kuraeva, I.V., Voytyuk, Yu.Yu., Samchyk, A.I., Karmazynenko, S.P., Bakmutov, V.G. (2018a). Ecological-geochemical assessment of the territories for the municipal solid waste disposal. *Exploration and Environmental Geochemistry (Ukraine)*, 1 (19), 22–26. [in Ukrainian].
- Azimov, O.T., Kuraeva, I.V., Trofymchuk, O.M., Karmazynenko, S.P., Dorofey, Ye.M., Voytyuk, Yu.Yu. (2019b). Estimation of the heavy metal pollution for the soils and different environmental objects within the solid domestic waste landfills. *18th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 13-16 May, Kyiv, Ukraine, Conference Paper. doi: 10.3997/2214-4609.201902129.
- Azimov, O.T., Tomchenko, O.V., Karmazynenko, S.P., Kuraeva, I.V., Voytyuk, Yu.Yu. (2018b). Monitoring the municipal solid waste landfill areas using the remote sensing technologies. *Program development on the waste management for the united territorial communities: key problematic issues and the best practices: Proc. of National Forum "Waste management in Ukraine: legislation, economics, technologies"*, Kyiv, 22-23 November. Kyiv: Centre for the ecological education and information, 84–87. [in Ukrainian].
- Azimov, O.T., Trofymchuk, O.M., Kuraeva, I.V., Karmazynenko, S.P. (2019). Estimations of heavy metals in soils and different landscape components within the municipal solid waste disposal areas. *Environmental safety and natural resources (Ukraine)*, 2 (30), 5–17. [in Ukrainian].
- Baum, R.L., Miyagi, T., Lee, S., Trofymchuk, O.M. (2014). Introduction: Hazard mapping. In: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (Eds.) *Landslide science for a safer geoenvironment. 2: Methods of landslide studies*. Cham: Springer, 395–396. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05050-8_61
- Buts, Yu.V., Nekos, A.N. (2012). On environmental hazards for the geosystems' components on testing grounds for municipal solid waste (research on heavy metal concentrations in components of geosystems). *Problems of Continuous Geographic Education and Cartography: Scientific Journal (Ukraine)*. Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv Nat. Univ., 16, 22–25. Retrieved September 6, 2019, from http://goik.univer.kharkov.ua/wp-content/files/issue_16/16_7.pdf. [in Ukrainian].

solid waste landfills on the surface water quality in the adjacent ponds. *13th International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 12-15 November, Kyiv, Ukraine, Conference Paper. doi: 10.3997/2214-4609.201903228.

Azimov, O.T., Kuraeva, I.V., Trofymchuk, O.M., Karmazynenko, S.P., Dorofey, Ye.M., Voytyuk, Yu.Yu. (2019b). Estimation of the heavy metal pollution for the soils and different environmental objects within the solid domestic waste landfills. *18th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 13-16 May, Kyiv, Ukraine, Conference Paper. doi: 10.3997/2214-4609.201902129.

Baum, R.L., Miyagi, T., Lee, S., Trofymchuk, O.M. (2014). Introduction: Hazard mapping. In: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (Eds.) *Landslide science for a safer geoenvironment. 2: Methods of landslide studies*. Cham: Springer, 395–396. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05050-8_61

Chadar, S.N., Chadar, K. (2017). Solid waste pollution: A hazard to environment. *Recent Advances in Petrochemical Science (Mini Review)*, 2, 3, 1–3. doi: 10.19080/RAPSCI.2017.02.555586. Retrieved September 6, 2019, from <https://juniperpublishers.com/rapscl/pdf/RAPSCI.MS.ID.555586.pdf>

Kaliaskarova, Z.K., Aliyeva, Zh.N., Ikanova, A.S., Negim, E.S.M. (2019). Soil pollution with heavy metals on the land of the Karasai landfill of municipal solid waste in Almaty city. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*, 6, 438, 256–267. Retrieved January 30, 2020, from <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.177>

Ohwohere-Asuma, O., Aweto, K.E. (2013). Leachate characterization and assessment of groundwater and surface water qualities near municipal solid waste dump site in Effurun, Delta State, Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science*, 3, 9, 126–134. Retrieved September 6, 2019, from <https://pdfs.semanticscholar.org/2f2d/d8692404821640dce47d3542cba3c45e358a.pdf>

Postacchini, L., Ciarapica, F.E., Bevilacqua, M. (2018). Environmental assessment of a landfill leachate treatment plant: Impacts and research for more sustainable chemical alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1021–1033. Retrieved September 6, 2019, from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.219>

References

- Abd El-Salam, M.M., Abu-Zuid, G.I. (2015). Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt. *Journal of Advanced Research*, 6, 4, 579–586. Retrieved September 6, 2019, from <https://doi.org/10.1016/j.jare.2014.02.003>
- Ali, S.M., Pervaiz, A., Afzal, B., Hamid, N., Yasmin, A. (2014). Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites of Islamabad city. *Journal of King Saud University – Science*, 26, 1, 59–65. Retrieved September 6, 2019, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364713000517>
- Azimov, O.T., Bakmutov, V.G., Voytyuk, Yu.Yu., Dorofey, Ye.M., Karmazynenko, S.P., Kuraeva, I.V. (2018). Reconnaissance integrated geoeological study of the disposal region for municipal solid waste with the aim of environmental assessment. *12th International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13-16 November, Kyiv, Ukraine, Conference Paper. doi: 10.3997/2214-4609.201803142.
- Azimov, O.T., Dorofey, Ye.M., Trofymchuk, O.M., Kuraeva, I.V., Zlobina, K.S., Karmazynenko, S.P. (2019a). Monitoring and assessment of impact of municipal solid waste landfills on the surface water quality in the adjacent ponds. *13th International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 12-15 November, Kyiv, Ukraine, Conference Paper. doi: 10.3997/2214-4609.201903228.
- Azimov, O.T., Kuraeva, I.V., Voytyuk, Yu.Yu., Samchyk, A.I., Karmazynenko, S.P., Bakmutov, V.G. (2018a). Ecological-geochemical assessment of the territories for the municipal solid waste disposal. *Exploration and Environmental Geochemistry (Ukraine)*, 1 (19), 22–26. [in Ukrainian].
- Azimov, O.T., Kuraeva, I.V., Trofymchuk, O.M., Karmazynenko, S.P., Dorofey, Ye.M., Voytyuk, Yu.Yu. (2019b). Estimation of the heavy metal pollution for the soils and different environmental objects within the solid domestic waste landfills. *18th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 13-16 May, Kyiv, Ukraine, Conference Paper. doi: 10.3997/2214-4609.201902129.
- Azimov, O.T., Tomchenko, O.V., Karmazynenko, S.P., Kuraeva, I.V., Voytyuk, Yu.Yu. (2018b). Monitoring the municipal solid waste landfill areas using the remote sensing technologies. *Program development on the waste management for the united territorial communities: key problematic issues and the best practices: Proc. of National Forum "Waste management in Ukraine: legislation, economics, technologies"*, Kyiv, 22-23 November. Kyiv: Centre for the ecological education and information, 84–87. [in Ukrainian].
- Azimov, O.T., Trofymchuk, O.M., Kuraeva, I.V., Karmazynenko, S.P. (2019). Estimations of heavy metals in soils and different landscape components within the municipal solid waste disposal areas. *Environmental safety and natural resources (Ukraine)*, 2 (30), 5–17. [in Ukrainian].
- Baum, R.L., Miyagi, T., Lee, S., Trofymchuk, O.M. (2014). Introduction: Hazard mapping. In: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (Eds.) *Landslide science for a safer geoenvironment. 2: Methods of landslide studies*. Cham: Springer, 395–396. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05050-8_61
- Buts, Yu.V., Nekos, A.N. (2012). On environmental hazards for the geosystems' components on testing grounds for municipal solid waste (research on heavy metal concentrations in components of geosystems). *Problems of Continuous Geographic Education and Cartography: Scientific Journal (Ukraine)*. Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv Nat. Univ., 16, 22–25. Retrieved September 6, 2019, from http://goik.univer.kharkov.ua/wp-content/files/issue_16/16_7.pdf. [in Ukrainian].

Chadar, S.N., Chadar, K. (2017). Solid waste pollution: A hazard to environment. *Recent Advances in Petrochemical Science (Mini Review)*, 2, 3, 1–3. doi: 10.19080/RAPSCI.2017.02.555586. Retrieved September 6, 2019, from <https://juniperpublishers.com/rapscl/pdf/RAPSCI.MS.ID.555586.pdf>

Horokh, N.P. (2005). Environmental assessment of the hazardous substances when disposing of municipal waste. *Municipal economy of cities: Scientific & technical collection (Ukraine)*. Kharkov: A.N. Beketov Nat. Univ. of Urban Development of Kharkov, 63, 172–181. Retrieved September 6, 2019, from <https://eprints.kname.edu.ua/2155/>. [in Russian].

<https://www.google.com/maps>

Kaliaskarova, Z.K., Aliyeva, Zh.N., Ikanova, A.S., Negim, E.S.M. (2019). Soil pollution with heavy metals on the land of the Karasai landfill of municipal solid waste in Almaty city. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*, 6, 438, 256–267. Retrieved January 30, 2020, from <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.177>

Nikitin, D.P., Novikov, Yu.V., Roschin, A.V., Zhilov, Yu.D., Marchenko, D.G., Yasinskiy, A.A. (1990). Manual of health assistant and epidemiologist assistant. Ed. D.P., Nikitin, A.I., Zaichenko. Moscow: Meditsina. [in Russian].

Ohwoghere-Asuma, O., Aweto, K.E. (2013). Leachate characterization and assessment of groundwater and surface water qualities near municipal solid waste dump site in Effurun, Delta State, Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science*,

3, 9, 126–134. Retrieved September 6, 2019, from <https://pdfs.semanticscholar.org/2ffd/d8692404821640dce47d3542c3a3c45e358a.pdf>

Postacchini, L., Ciarpica, F.E., Bevilacqua, M. (2018). Environmental assessment of a landfill leachate treatment plant: Impacts and research for more sustainable chemical alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1021–1033. Retrieved September 6, 2019, from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.219>

Samoiilyk, M.S., Molchanova, A.V. (2017). Ecological aspects of influence of solid domestic wastes on the environment. Filtrate. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy (Ukraine)*, 1-2, 88–91. Retrieved September 6, 2019, from <http://journals.pdaa.edu.ua/visnyk/article/view/86/120>. [in Ukrainian].

State of the municipal waste treatment sphere in Ukraine for 2018. (2019). Kyiv: The Ministry for Regional Development, Building and Housing of Ukraine. Retrieved March 25, 2019, from http://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/teritory/stan-sferi-povodzhennya-z-pobutovimi-vidhodami-v-ukrayini-za-2018-rik/?fbclid=IwAR1o8-GKuiH_3jPkv8Xa089vdJ_VRR2W6MEePun-rjTMN124pNLdrcoulr7Q. [in Ukrainian].

Water. General requirements to collection of samples. State Standard, Russian Federation GOST R 51592-2000. (2000). (adopted and brought into action by the decision of Gosstandart of Russia after 21 April, 2000, N 117 particle). [Date of Entry – 1 July, 2001]. Moscow: Gosstandart Press. [in Russian].

Надійшла до редколегії 10.03.2020

O. Azimov¹, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher, Leading Researcher,

E-mail: azimov@casre.kiev.ua;

I. Kuraeva², Dr. Sci. (Geol.), Prof.,

E-mail: ki4412674@gmail.com;

O. Trofymchuk³, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Corresponding Member of NAS of Ukraine,

E-mail: itelua@kv.ukrtel.net;

K. Zlobina⁴, Cand. Sci. (Geol.), Researcher,

E-mail: ecaterinka@ukr.net;

S. Karmazynenko⁴, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher,

E-mail: karmazinenko78@gmail.com;

¹Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine,

55-B O. Honchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine;

²M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of NAS of Ukraine,

³Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine,

13 Chokolivskiy Blvd., Kyiv, 03186, Ukraine;

⁴Ac. Palladin Ave., Kyiv, 03680, Ukraine;

⁴Institute of Geography of NAS of Ukraine,

44, Volodymyrska Str., Kyiv, 01030, Ukraine

MONITORING ASSESSMENT OF THE SURFACE WATER QUALITY WITHIN THE AREAS FOR THE MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL

The monitoring ecological hydro-geochemical investigations for the surface waters of the north-western part of Landfill No 5 for the municipal solid waste disposal and the adjacent area are carried out. Based on analyses of surface water samples taken from the existing ponds, it was found that they are polluted by wastewater with the high content of predominantly organic toxicants. Most likely the latter comes from both the Sections and ponds-collectors of leachate or from the pig farm, which is located near the Landfill but hypsometrically higher in relief. More studies are required in order to specify the answer.

On the other hand, surface waters beyond the Landfill area are characterized by the ecological and hydrogeochemical indicators, which are not higher than the maximum allowable concentrations, although they are higher than the background ones. This indicates that the considerable outflow of chemical pollutants together with the surface waters from the north-western Landfill No 5 area beyond its borders is absent for more than a year. Only the short-time periodic monitoring of the water bodies within the territory of interest would allow to determine such time intervals when water could be polluted by various toxicants.

Keywords: Landfill, solid waste, toxicants, surface waters, geochemical analysis.

A. Азимов¹, д-р геол. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр.,

E-mail: azimov@casre.kiev.ua;

И. Кураева², д-р геол. наук, проф.,

E-mail: ki4412674@gmail.com;

А. Трофимчук³, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Украины,

E-mail: itelua@kv.ukrtel.net;

Е. Злобина⁴, канд. геол. наук, науч. сотр.,

E-mail: ecaterinka@ukr.net;

С. Кармазиненко⁴, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр.,

E-mail: karmazinenko78@gmail.com;

¹Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины,

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

²Институт геохимии, минералогии и рудообразования имени Н.П. Семеновко НАН Украины,

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

³Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины,

Чоколовский б-р, 13, г. Киев, 03186, Украина;

⁴Институт географии НАН Украины,

ул. Владимирская, 44, г. Киев, 01030, Украина

МОНИТОРИНГОВАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В РАЙОНАХ ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

В северо-западной части Киевского полигона № 5 захоронения твердых бытовых отходов и сопредельном районе проведены мониторинговые эколого-гидрогеохимические исследования поверхностных вод. На основе анализа отобранных из имеющихся водоемов проб поверхностных вод полигона выявлено загрязнение их сточными водами со значительным содержанием, прежде всего, органических токсикантов. Вероятно, последние поступают или с карт и прудов-фильтратонакопителей полигона, или со свинофермы, расположенной неподалеку и гипсометрически выше по поверхности рельефа. Для конкретизации ответа необходимы дополнительные исследования.

Вместе с тем, поверхностные воды вне территории полигона характеризуются эколого-гидрогеохимическими показателями, которые не превышают предельно допустимые концентрации, однако они выше фоновых значений. Это свидетельствует о том, что существенного выноса химических загрязнителей с поверхностными водами с территории северо-западной части полигона № 5 за его пределы в течение периода больше полугода нет. Только коротко периодический мониторинг водных объектов территории способен установить те временные интервалы, в пределах времен года, когда может происходить загрязнение вод различными токсикантами.

Ключевые слова: полигон, бытовые отходы, токсиканты, поверхностные воды, геохимический анализ.

УДК 556.3:553.98

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.09>

Я. Малькова, асп.,

ORCID iD 0000-0002-6215-9901,

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

Є. Яковлев, д-р техн. наук,

ORCID iD 0000-0001-6562-4015,

E-mail: yakovlev1939@mail.ua;

В. Долін, д-р геол. наук, проф.,

ORCID iD 0000-0001-6174-2962,

E-mail: vdolin@ukr.net;

ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України",

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

ЕКОЛОГО-ТЕХНОГЕННІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ РОЗСОЛІВ ДОМБРОВСЬКОГО КАР'ЄРУ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О.Л. Шевченком)

Домбровський кар'єр, який експлуатувався з 1967 р., єдиний у світі, де відкритим способом видобувалася калійна руда. У статті розглядається механізм формування тіла водно-солевих розсолів у Домбровському кар'єрі та наведено стислий огляд проблем, які виникли внаслідок тривалої розробки Калуш-Голинського родовища калійних солей і накопичення відходів у зоні гідралічно-геофільтраційного впливу виробництва. До таких проблем належать затоплення Домбровського соляного кар'єру, розмив солевмісних відвалів атмосферними опадами, переповнення хвостосховищ, забруднення вод четвертинного надсолевого водоносного горизонту та небезпека істотного погіршення якості води в міському водозаборі, розвиток соляного карсту та просідання земної поверхні над виробленим простором шахт з деформацією чи руйнуванням інженерних споруд, житлових будівель тощо. Проаналізовано аналітичні дані щодо динаміки водопритливів до кар'єру і збільшення зони дренажного впливу прибортової частини кар'єру, що супроводжується осушенням кільцевої дренажної траншеї – відриє рівня підземних вод від ложа, розвитком карстоутворення по периферії кар'єру (до 250–350 м і більше), аномальним збільшенням глинисто-пилових фракцій у стічних водах кар'єру після повені 2008 р. з одночасним зростанням водопритливів. Згідно з дослідженнями можна зробити висновки щодо розвантаження рідкого тіла наповнення кар'єру в товщу галечникового надсолевого водоносного горизонту, заповнення карстових порожнин, розмивання бортів, зростання обсягу чаші кар'єру та розміру області дренажу ґрунтових вод алювіальних гравійно-піщаних відкладів терас річок Сівка та Лімниця.

На основі отриманих результатів зроблено висновок щодо загрози розвитку надзвичайної ситуації та погіршення безпеки життєдіяльності на територіях з порушеними екологічними параметрами геологічного середовища. Існує необхідність штучного коригування прогностичних екологічних параметрів довкілля за даними моніторингових спостережень.

Ключові слова: родовище, соляні розсоли, карстово-суфозійний процес, надзвичайна ситуація, водопритливі.

Вступ. Калуш-Голинське родовище калійних солей розташовано у фронтальній північно-східній частині Самбірського покриття внутрішньої зони Передкарпатського прогину. Самбірський покрив, виконаний утвореннями нижніх і верхніх молас, зірваний зі своєї основи та насунутий на зовнішню (Більче-Волицьку) зону прогину. Фронт Стебницького насуву (границя Самбірського насуву) розміщений на північному заході неподалік від м. Калуш. Для Калуш-Голинського родовища в геологічному розрізі характерно моноклінальне залягання соленосних товщ, ускладнених насунутою та розломною тектонікою, що зумовило розділення моласових відкладів на низку блоків, повторення розрізу та багаторазове повторення лінзоподібних калійних покладів у соленосній товщі.

Розріз родовища калійних солей складено породами стебницької світи, перекритими відкладами балицької світи і галицької серії нижнього міоцену. Стебницька світа представлена переважно глинами із прошарками пісковиків та алевролітів. Балицька світа поділяється на нижню і верхню. Нижньобалицька світа представлена мергелями, над якими залягає соленосна товща з гіпсоангідритовим горизонтом у підшві. Соленосна товща (соленосна брекчія з галітовим цементом) уміщує калійний пласт лангбейніт-каїнітового складу та вкраплення карналіту і сильвініту. Калієносні поклади перекриваються четвертинними утвореннями, представленими суглинками і галечниками загальною потужністю 5–30 м. У зоні вивітрювання порід соленосної товщі розвинута гіпсо-глиниста "шапка", потужністю від 3 до 30 м. Верхньобалицька світа представлена глинами, алевролітами і мергелями з прошарками галіту. Породи балицької світи перекриті четвертинними гравійно-гальковими відкладами (водоносним горизонтом питної води), суглинками та частково відкладами галицької серії, які складаються з мергелів,

пісковиків, глини туфитів богородчанської світи, гіпсів та ангідритів тиранської світи, мергелями, глинами і туфами косовської світи, а також глинами з пісковиками, алевролітами і конгломератами бугловського горизонту. Серед цих порід виявлені карстові воронки діаметром від 0,3 до 1,0 м, які виповнені різнозернистим піском і галькою. Закономірність їхнього розподілу не встановлена.

У межах родовища містяться три водоносні горизонти: верховодка, гравійно-гальковий водоносний горизонт і води соляного дзеркала. Верховодка приурочена до суглинків і залягає на глибині до двох метрів; для неї характерний непостійний режим, залежний від кліматичних умов. Гравійно-гальковий водоносний горизонт має площинне поширення та активне інфільтраційне живлення і є єдиним у цьому районі горизонтом питної води. Часткове розвантаження його потоку витрачається на поновлення карстових вод по товщі піско-глинистої "шапки" і соленосних відкладів (Кореневський та Донченко, 1963).

Постановка проблеми. Каїніт-лангбейнітові калійні руди з високим вмістом галіту та глинистих мінералів видобували понад 100 років шахтним і кар'єрним (від 1967 р.) способом. Домбровський кар'єр – єдиний у світі, де відкритим способом видобувалася калійна руда. До 2008 р. окремо існували північна та південна дільниці, які поступово наповнювалися водами та збільшувалися в об'ємі (рис. 1, а, б). Після гідралічного сполучення обох дільниць у результаті масштабної повені 2008 р., збільшеного надходження до кар'єру атмосферних опадів і ґрунтових вод (рис. 1, с, d та e), через відсутність ефективної (захисної) дренажної системи круті укоси стали дуже нестабільними. У північній частині кар'єру прогресують карстові утворення, що супроводжуються виникненням великих промоїн у напрямку р. Сівка, яка є притокою р. Дністер.

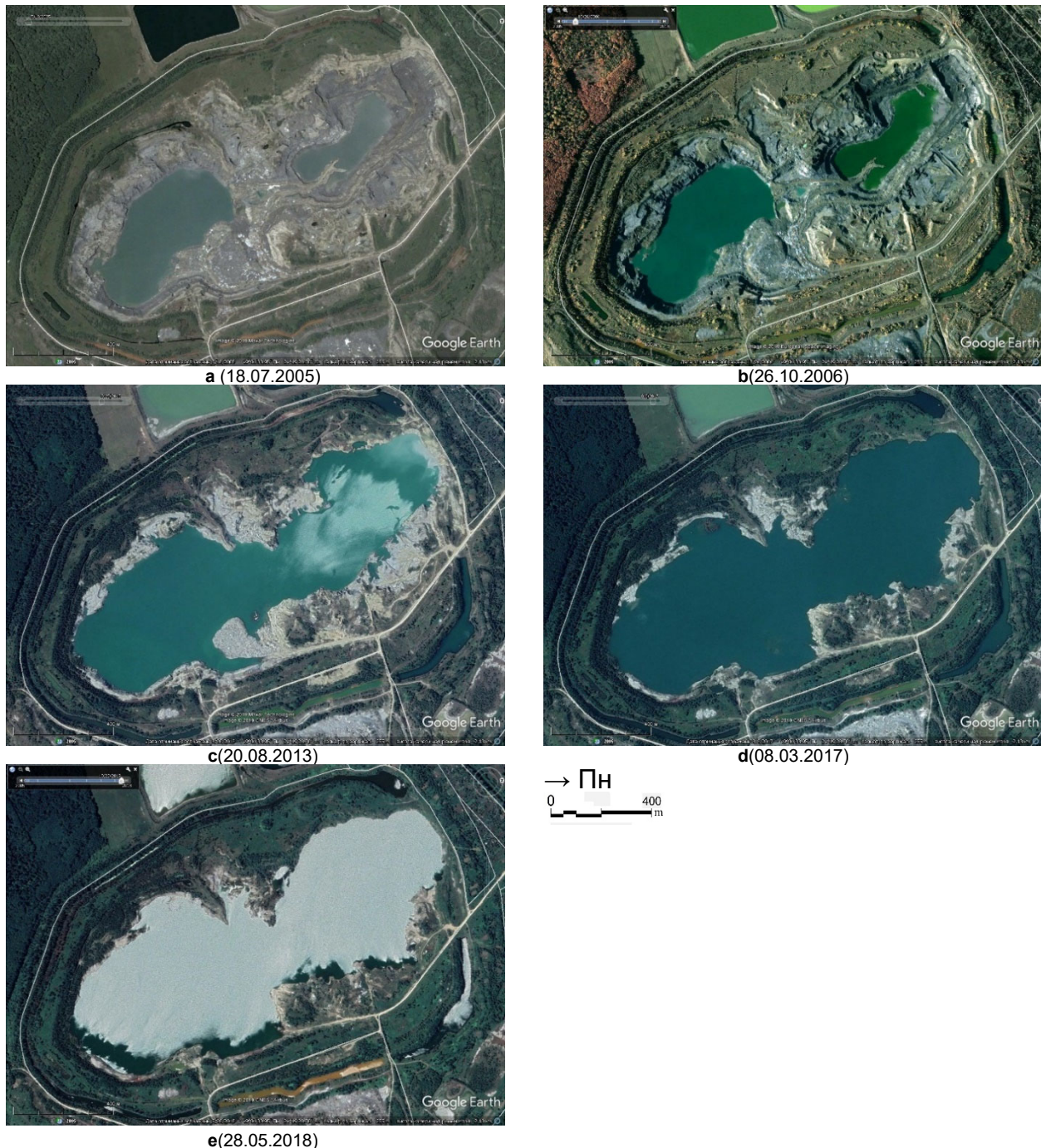


Рис. 1. Космічні знімки Домбровського кар'єру. Джерело: інтернет-ресурс "Google Earth"

На кар'єрі роботи велись за транспортною системою розробки з вивезенням автосамоскидами розкривних порід на зовнішні та внутрішні відвали, руди – до дробарного цеху. Розпушення руди і скельних розкривних порід проводилось буро-вибуховим способом, що сприяло зниженню щільності солепородного масиву, формуванню водопроникних тріщинних і розущільнених (полаблених) ділянок, активізації зон потенційного карстоутворення.

Видобуток калійних руд супроводжувався складуванням розкривних порід із вмістом легкорозчинних солей до 70 % у двох солевідвалах на східному борті Домбровського кар'єру (Семчук та Малишевська, 2002). У процесі збагачення калійних руд утворювалися значні об'єми солевмісних відходів, які розміщували у хвостосховищах і шламонакопичувачі (рис. 2).

Пухкі розкривні породи розроблялися чотирма уступами висотою до 10 м з організацією селективного виїмання: ґрунтово-рослинного шару, суглинків, галечників і гіпсо-глинистого покриву (кепрок). Скельні розкривні породи та рудний поклад з урахуванням їхньої підвищеної геомеханічної стійкості розроблялися уступами висотою до 15 м.

За весь період експлуатації з Домбровського кар'єру вилучено 35,4 млн м³ розкривних порід і 14,7 млн м³ калійної руди, разом – 50,1 млн м³ гірничої маси.

Геоінфільтраційне поле Домбровського кар'єру. Механізм утворення соляних розсолів у Домбровському кар'єрі – це переважно результат взаємодії атмосферних опадів із соленосними породами, тому їхній об'єм і баланс залежать від кількості опадів, обсягів розвантаження ґрун-

тового водоносного горизонту, площі водозбору та тривалості контакту рідкої (водної) і твердої (сольової) фаз. Площа водозбору в межах кільцевої дренажної траншеї

(КДТ) кар'єру становить 180 га. Об'єм утворюваних розсолів лише внаслідок інфільтрації атмосферних опадів (середня норма 700 мм/рік) становить 1,1 млн м³ на рік.

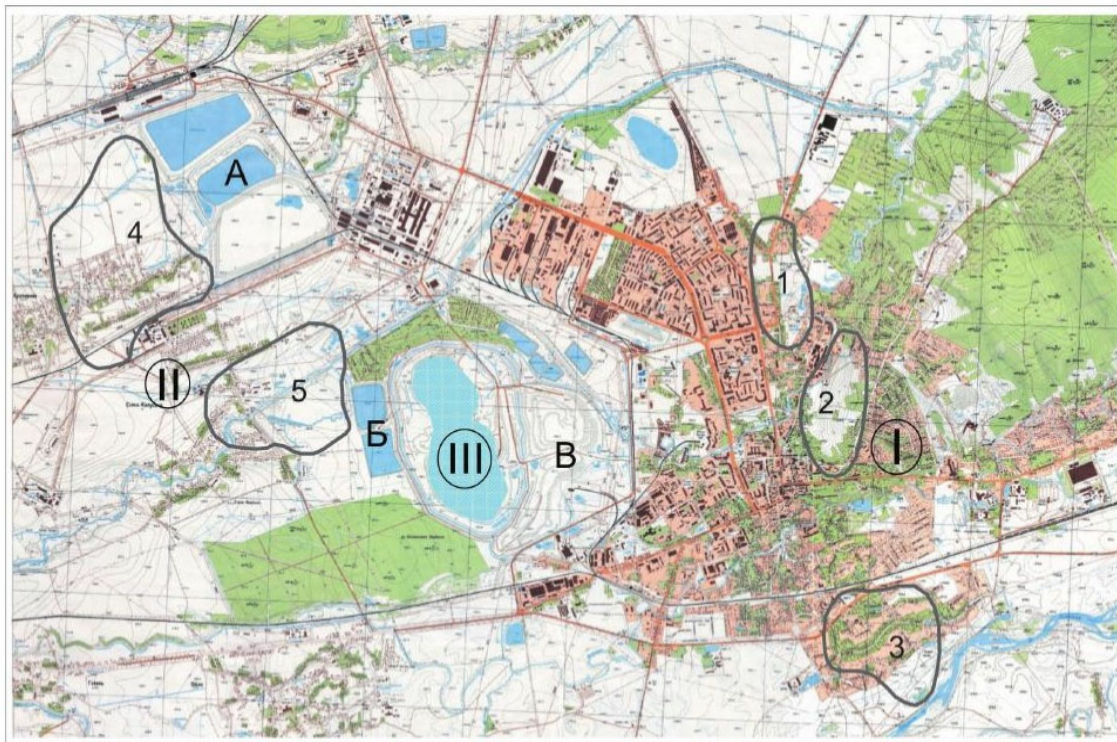


Рис. 2. Оглядова карта Калуш-Голинського родовища.

Рудники: I – "Калуш", II – "Нова Голинь", III – Домбровський кар'єр; шахтні поля: 1 – Північне каїнітове, 2 – Центральне каїнітове, 3 – Хотинське Сильвінітове, 4 – Східна Голинь, 5 – Сивка-Калуська; А – хвостосховища, Б – акумулюючі ємності, В – відвали кар'єру (Шуровський та ін., 2012)

Основним джерелом формування сталих водопритоків до Домбровського соледобувного кар'єру є водонесний комплекс четвертинних надсольових пухких відкладів: суглинки, переважно у верхній частині розрізу, які донизу переходять у піщано-гравійно-галькові водопроникні відклади. Вміст валунної фракції сягає 10–12 %, гальки – 35–60 %, гравію – від 13,5 до 52 %, піску – від 35 до 60 %, пилуватих і глинистих частинок – 0,2–6,5 %. Загальна товщина галькових відкладів змінюється від 1–3 до 8–11 м. Гідрогеофільтраційною особливістю піщано-гравійно-галькового водоносного горизонту є здатність до суфозійного винесення дрібнозернистих глинисто-пилових частинок при локальному збільшенні гідравлічного градієнта потоку або при місцевих деформаціях і зрушеннях водонасиченої товщі. Аналіз змін структури потоку піщано-гравійно-галькового горизонту в умовах формування депресійної воронки Домбровського кар'єру, місцевих зон підпірного живлення хвостосховищ і шламосховищ свідчить про сполучений вплив карстово-суфозійного процесу на розуцільнення порід і збільшення їхньої проникності.

За даними дослідно-фільтраційних робіт, коефіцієнти фільтрації надсольового горизонту у природному стані дорівнюють 1,2–2,0 м/добу (2,8–4,0 м/добу біля русла р. Сівка).

Зона Домбровського кар'єру в геолого-гідрогеологічному плані відрізняється мінімальними глибинами залягання сольового дзеркала (поверхні сольової товщі) та наявністю напірно-безнапірного піщано-гальково-гравійного горизонту в підшві пухких покривних порід. Розкриття кар'єрного поля в даних умовах призвело до активізації карстово-суфозійних процесів, збільшення інфільтрації атмосферних опадів унаслідок карстово-суфозійного розуцільнення покривних порід, передусім над карстовими

каналами та лійками (так званий "тунельний ефект"), прискореного руху підземних вод на межі із сольовим дзеркалом, збільшення міграції розчинних складових солерудного масиву до виробничого простору Домбровського кар'єру. Зростання витрат підземних вод при цьому збільшує їхню агресивність до солепородного масиву прикар'єрної зони та мінералізацію дренажних вод.

Створення КДТ майже на врізі уступу Домбровського кар'єру (замість відступу на 250 м за первинним проектом) істотно зменшило її гідрозахисну здатність і збільшило гідравлічні градієнти підземного потоку з поступовим зростанням суфозійного винесення глинисто-пилових фракцій та активізацією локального (точкового) і лінійного (канално-гідравлічного) карстоутворення.

Унаслідок цих процесів під впливом депресійної воронки, яка має наближену до площинно-радіальної структуру, гідрогеофільтраційне поле Домбровського кар'єру набуло строкатої неоднорідності. Загалом прийнято виділяти такі елементи гідрогеофільтраційного поля Домбровського кар'єру, які переважно пов'язані з його технологічними об'єктами: кар'єрне поле (дві дільниці), кільцева дренажна траншея, відвали, акумулюючі ємності, відвідний канал р. Сівки.

Мета досліджень полягала у виявленні причин, діючих чинників, а також математичному описанні динаміки й основних закономірностей та масштабів розвитку небезпечних процесів у зоні впливу Домбровського кар'єру.

Основні результати. Динаміка водопритоків до кар'єру оцінювалася за даними ДП "Калійний завод", ДП НДІ "Галургія" та ІФНТУНГ за період 1967–2013 рр. (рис. 3). Динаміка інтегрального водопритоку має експоненційний характер залежності від часу та з високою достовірністю описується кривою вигляду

$$V = a + b \cdot e^{k_B t}, \quad (1)$$

де k_B – константа швидкості водопритливу, яка має розмірність рік^{-1} . Величина k_B становить $0,071 \text{ рік}^{-1}$, що в межах 15 % збігається з попередніми оцінками, де не враховувалися дані після 2009 р. (Долін та ін., 2010).

Аналіз динаміки абсолютних відміток рівня розсолів Домбровського кар'єру дозволяє виділити протягом його експлуатації кілька часових періодів (рис. 4). Перший – від початку експлуатації (1967) – відмітка +175 м південної ділянки – до повені 2008 р., коли рівні південної північної ділянки зрівнялися – відмітка 255,4 м. У цей період заповнення кар'єру стримувалося штучним перехопленням водопритливів, відкачуванням води з кільцевої дренажної траншеї, закачуванням розсолів у шахти тощо. Другий період розпочався після повені 2008 р., гідралічного сполучення південного і північного кар'єрних полів і продовжувався до початку 2017 р. У цей період заходи щодо перехоплення водопритливів виявилися неефективними у зв'язку з руйнуванням і втратою дренажної здатності КДТ, збільшенням площі водозбору, інфільтраційного живлення внаслідок суфозійного

рихлення перекривних порід і, можливо, інтенсифікації витоків зі шлаго- і хвостосховищ. Слід зазначити, що відкачування розсолів у шахти неістотно уповільнювало заповнення кар'єру. Природно, що протягом обох періодів спостерігається зниження темпів зростання абсолютних відміток поверхні розсолів, що пов'язано з розширенням чаші кар'єру. На кінець березня 2017 р. рівень розсолів у кар'єрі досягнув відмітки +277,5 м, що відповідає найнижчому рівню прісного водоносного горизонту (найнижча абсолютна відмітка підосви водоносного горизонту в межах зовнішнього контуру кар'єру по осі КДТ становить 274,0 м, найвища – 293,0 м). Нині товща розсолів створює гідралічний підпір прісним водам підземного горизонту, що визначає зміну умов водного балансу об'єкта та початок третього умовного періоду квазістабільного наповнення кар'єру. Головною характерною рисою цього періоду стала можливість відносної просторово-часової стабілізації дзеркала поверхні розсолів за незначних перевищень підосви надсольового горизонту.

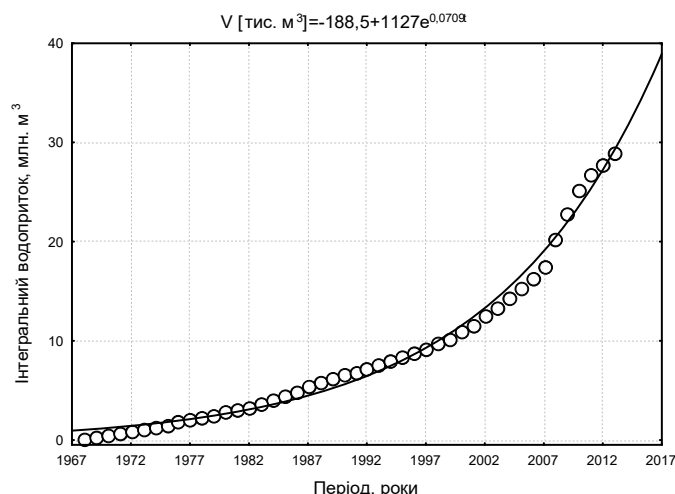


Рис. 3. Інтегральна (наростаючим підсумком) динаміка водопритливів до кар'єру.

Точками позначено експериментально-розрахункові дані ДП "Калійний завод", ДП НДІ "Галургія" та ІФНТУНГ

Динаміка абсолютних відміток поверхні розсолу в кожному з виділених періодів досить точно апроксимується кривою вигляду

$$H = H_0 + H_1 \cdot (1 - e^{-k_H t}), \quad (2)$$

де H_0 – початкова абсолютна відмітка для кожного з періодів, м; $H_0 + H_1$ – максимальна абсолютна відмітка дзеркала поверхні розсолу при збереженні темпів заповнення кар'єра в кожному з періодів, м; k_H – константа швидкості зростання абсолютних відміток поверхні дзеркала розсолу, рік^{-1} ; t – час, роки з нульовою точкою відліку для кожного з періодів.

Виходячи зі співвідношення k_H за відповідні періоди, можна зробити висновок, що підняття абсолютних відміток поверхні дзеркала розсолів у період 2008–2017 рр. відбувалося у п'ятеро швидше, ніж у попередній період (1967–2008) (табл. 1).

Згідно з проаналізованими даними, максимальне розрахункове підняття абсолютних відміток рівня дзеркала розсолу становить +281...+288 м (табл. 1). Виположення кривої швидкості зростання абсолютних відміток підводить до припущення, що при збереженні сучасних темпів зростання абсолютних відміток дзеркала розсолу кар'єр не буде заповнений до критичної відмітки +298 м. Натомість відбуватиметься розвантаження водно-сольового тіла наповнення кар'єру в товщу галечникового

водоносного горизонту, заповнення карстових порожнин, розмивання бортів, зростання обсягу чаші кар'єру та розміру області дренажу ґрунтових вод алювіальних гравійно-піщаних відкладів р. Сівка та Лімниця.

Такі ж самі два періоди виділяються при аналізі темпів наповнення кар'єру (рис. 5). Аналіз експериментально-розрахункових даних ДП "Калійний завод", ДП "НДІ Галургія" та ІФНТУНГ дає підстави для апроксимації їхнім рівнянням

$$\lg V = V_0 + V_1 \cdot (1 - e^{-k_V t}). \quad (3)$$

Фізичний сенс параметрів цього рівняння такий самий, як і у формулі (2). Об'єм розсолів позначено літерою V , k_V – константа швидкості наповнення кар'єру розсолами, розмірність якої рік^{-1} .

Величина k_V протягом 2008–2017 рр. удвічі вища, ніж у період 1967–2008 рр. відповідно, зросли темпи наповнення кар'єру (табл. 2).

Розрахункові максимальні об'єми наповнення у різні періоди, розраховані за формулою

$$V_{\max} = 10^{V_0 + V_1} \quad (4)$$

становлять 11,9–33,1 млн м^3 .

Збільшення водопритливів до кар'єру є ознакою подальшої активізації карстово-суфозійного процесу. Головними чинниками збільшення притливу виступають:

1) підвищена фільтрація в межах прилеглої до кар'єру річкової долини р. Сівка із зростанням суфозійної проникності порід;

2) наявність деформації породного цілику між дренажною траншеєю і уступом кар'єру;

3) підпірний вплив з боку хвостосховища.

На нашу думку, наслідком збільшення кар'єрного припливу буде розвиток двох процесів, які вплинуть на прискорення руху солоних вод у гідрогеофільтраційному полі ґрунтового водоносного горизонту до місцевих зон дренавання в руслах місцевих р. Млинівка та Лімниця:

1) збільшення гідравлічного градієнта ґрунтового водоносного горизонту в прибортовій зоні до величини $I = \alpha \cdot M_k = 0.00065 \cdot 60 \approx 0.04$ при фоновому значенні $I \approx 0,005$, де α – коефіцієнт зростання густини мінералізованих вод ($M = 1 \div 350$ г/дм³), $\alpha = 0,00065$ (Бондаренко та ін., 1998); $M_k = 60$ г/дм³ – мінералізація верхнього шару кар'єрних вод;

2) об'ємно-структурна деградація колоїдних сполук у глинистих прошарках зі збільшенням проникності порід ґрунтового водоносного горизонту.

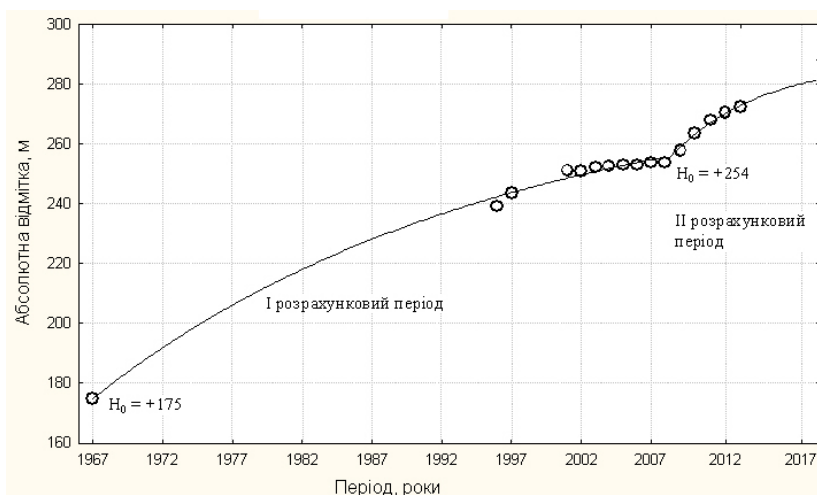


Рис. 4. Динаміка рівня розсолів (за абсолютними відмітками) у південній ділянці Домбровського кар'єру. Точками нанесено експериментальні дані ДПНДІ "Галургія"

Таблиця 1

Розрахункові параметри динаміки абсолютних відміток дзеркала розсолу

Період, роки	H_0 , м	H_1 , м	$H_0 + H_1$	k_H , рік ⁻¹
1967–2008	175	106	281	0,0346
2008–2017	254	34	288	0,162

Таблиця 2

Розрахункові параметри динаміки об'єму розсолу (у логарифмічних координатах рівняння)

Період, роки	V_0	V_1	$V_0 + V_1$	k_V , рік ⁻¹
1967–2008	0	7,077	7,077	0,0906
2008–2017	6,795	0,725	7,52	0,175

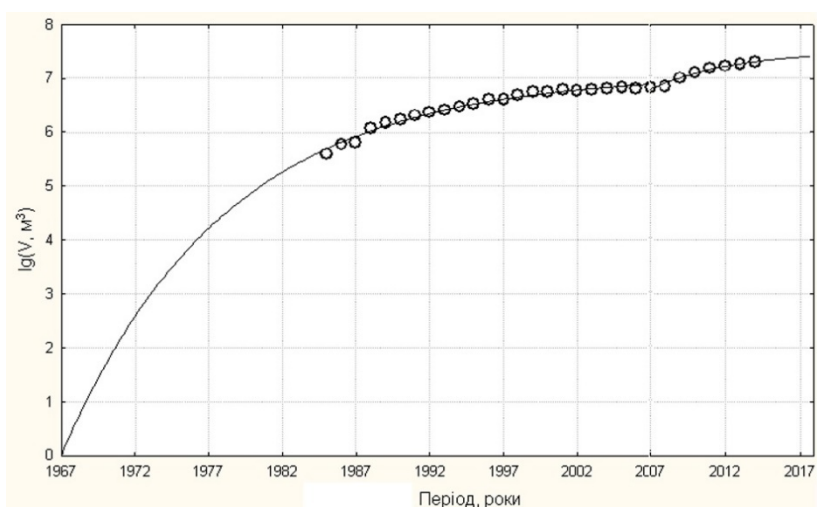


Рис. 5. Динаміка об'єму розсолу в кар'єрі (південній і північній ділянках). Точками показано дані, розраховані із цифрової моделі ІФНТУНГ (за абсолютними відмітками рівня), доповнені експериментальними даними ДП "Калійний завод"

Слід зазначити, що після підйому рівня кар'єрних вод до відмітки +278 м, досягнутої в березні 2017 р., змінилася структура водного балансу кар'єру, відповідно прогнозовані

параметри вимагають істотного корегування на базі моніторингових спостережень та експериментального визначення гідравлічних (прибортова зона) та фільтраційних

(латеральна зона потоку ґрунтових вод) параметрів галечникового (надсолітового) водоносного горизонту.

З аналізу наведених даних можна зробити висновок щодо збільшення зони дренажного впливу прибортової частини кар'єру, що підтверджується осушенням КДТ (відбив рівня підземних вод від ложа), розвитком карстоутворення по периферії кар'єру (до 250–350 м і більше), аномальним збільшенням глинисто-пилових фракцій у стічних водах кар'єру, що особливо характерно в період після повені 2008 р., з одночасним **зростанням водопритливів**.

Розширення території прояву карстово-суфозійного процесу істотно зменшило геотехнічну стійкість покривних порід у підґрунті гідротехнічних споруд (дамб, бортів КДТ та ін.), **що може призвести до розвитку надзвичайної ситуації** (НС):

1) прориву рідких стоків хвостосховища № 1 до кар'єру;
2) аварійного прориву стоку р. Сівка до кар'єру з його наступним прискореним затопленням;

3) формування техногенного стоку високомінералізованих вод у басейні річок Сівка–Лімниця–Дністер у геофільтраційній системі піщано-гравійно-галькових відкладів і карстових утворень надсолітового дзеркала.

Висновки. Таким чином, утворення соляних розсолів у Домбровському кар'єрі – це переважно результат водно-балансової та фізико-хімічної взаємодії атмосферних опадів із соленосними породами. Накопичення соляних розсолів залежить від кількості опадів, обсягів розвантаження ґрунтового водоносного горизонту, площі водозбору та тривалості контакту рідкої (водної) й твердої (солітової) фаз.

Кільцева дренажна траншея, побудована вздовж борту Домбровського кар'єру, суттєво зменшила свою гідрозахисну здатність і збільшила гідравлічні градієнти підземного потоку з поступовим зростанням суфозійного винесення глинисто-пилових фракцій та активізацією локального і лінійного карстоутворення.

Динамічному розвитку карстово-суфозійного процесу сприяли:

- значна площа відслонення піщано-гравійно-галькового горизонту по периметру кар'єру;
- збільшення проникнення водонасичених порід унаслідок винесення дрібнозернистих фракцій з одночасним розуцільненням над зонами карстоутворення.

Розширення території прояву карстово-суфозійного процесу істотно зменшує геотехнічну стійкість покривних порід у підґрунті гідротехнічних споруд, що може призвести до надзвичайної ситуації в регіоні.

Високий ризик розвитку НС підтверджується руйнуванням північної ділянки КДТ унаслідок прояву зсувних

деформацій на укосах бортів кар'єру та їхнього наближення до долини р. Сівка, яка успадковує ослаблену зону породного масиву (швидкість більше 50 м/рік за даними геофізичних і натурних спостережень). Розвиток карстово-суфозійного процесу в західному напрямку до незаповнених високомінералізованими розчинами камер Хотинського рудника визначає небезпеку винесення значних обсягів солі у р. Дністер та виникнення надзвичайної ситуації транскордонного характеру.

Гідрогеологічна та геохімічна ситуація на території Калуш-Голинського родовища свідчить про необхідність збільшення комплексності (гідрологічні, гідрогеохімічні, геофізичні, дистанційні та ін. спостереження) екологічного моніторингу природно-техногенної геосистеми "техногенний комплекс кар'єру – навколишнє середовище" для своєчасного виявлення та запобігання розвитку надзвичайної ситуації.

Список використаних джерел

Бондаренко, С.С., Куликов, Г.В., Лубенский, Л.А. (1988). Геолого-экономическая оценка месторождений подземных промышленных вод. Москва : Недра.

Долін, В.В., Яковлев, Є.О., Кузьменко, Е.Д., Бараненко, Б.Т. (2010). Прогнозування екогідрогеохімічної ситуації при затопленні Домбровського кар'єру калійних руд. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсо-користування*, 1, 74–87.

Кореневский, С. М., Донченко, К. Б. (1963). Геология и условия формирования калийных месторождений Советского Предкарпатья. *Труды ВСЕГЕИ. Геология месторождений калийных солей*, 99, 152.

Семчук, Я.М., Малишевська, О.С. (2002). Дослідження процесів розчинення та вилуговування соляних порід для оцінки наслідків затоплення калійних шахт. *Хімічна промисловість України*, 1, 9–12.

Шуровський, О.Д., Анікеєв, С.Г., Шамотко, В.І., Дешиця, С.А., Ніколаєнко, О.А., Поплюйко, А.Г. (2012). Геофізичний моніторинг екобезпеки геологічних процесів в агломерації м. Калуша. *Мінеральні ресурси України*, 2, 31–39.

References

Bondarenko, S.S., Kulikov, G.V., Lubensky, L.A. (1998). Geological and economical assessment of underground industrial water deposits. Moscow : Nedra. [in Russian]

Dolin, V.V., Yakovlev, E.O., Kuzmenko, E.D., Baranenko, B.T. (2010). Prediction of the ecohydrogeochemical situation in the flooding of the Dombrovskiy quarry potashmine. *Environmental safety and balanced resource use*, 1, 74–87. [in Ukrainian]

Korenevskiy, S.M., Donchenko, K.B. (1963). Geology and conditions of potassium deposits formation of the Sovetskoe Predkarpatya. *Geology of potassium salt deposits. Proceedings of VSEGEI*, 99, 152. [in Russian]

Semchuk, Ya.M., Malishevskaya, O.S. (2002). Preparation of salt pores for the detection of potassium mines flooding. *Ukrainian Chemical Industry*, 1, 9–12. [in Ukrainian]

Shurovsky, O.D., Anikeev, S.G., Shamotko, V.I., Deshitsu, S.A., Nikolaenko, O.A., Poplyuyko, A.G. (2012). Geophysical monitoring of ecohazardous geological processes in the agglomeration of Kalush. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 31–39. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 29.07.2020

Y. Malkova, PhD Student,
ORCID ID 0000-0002-6215-9901,
E-mail: malkovayanakiev@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
Y. Yakovlev, Dr. Sci. (Tech.),
ORCID ID 0000-0001-6562-4015,
E-mail: yakovlev1939@mail.ua;
V. Dolin, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
ORCID ID 0000-0001-6174-2962,
E-mail: vdolin@ukr.net;
State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine",
34, a, Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

ECOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL REGULARITIES OF SALT BRINES FORMATIONS OF DOMBROVSKY QUARRY

The Dombrovsky quarry, which has been in operation since 1967, is the only one in the world where potash ore has been mined by open-pit method. The article considers the body formation mechanism of water-salt brines in the Dombrovsky quarry and gives a brief overview of the problems due to long-term development of the Kalush-Golynsky potassium salts deposit and waste accumulation in the area of hydraulic geofiltration. Such problems include flooding of the Dombrovsky salt quarry, erosion of salt dumps by precipitation, tailings overflows, pollution of the Quaternary supersalt aquifer and significant water quality deterioration danger in urban water intake, development of salt karst and subsidence of the earth's surface, destruction of engineering structures, residential buildings, etc. Analytical data of water inflows dynamics into the quarry and the increase of the drainage area of the

quarry riparian part was analyzed, accompanied by drainage of the circular drainage trench – separation of groundwater level from the bed, the karst formation development on the periphery of the quarry (up to 250–350 m and more), anomalous increase in clay-dust fractions in the quarry wastewater after the flooding 2008 with a simultaneous increase in water inflows. According to the research, we can make a conclusion about the unloading of liquid body filling the quarry in the thickness of the pebble supersalt aquifer, filling karst cavities, erosion of the quarry, increasing the volume of the quarry bowl and the size of the groundwater drainage area of alluvial gravel-sand deposits of Sivka and Lymnutsya.

Based on the obtained results, a conclusion was made regarding the threat of the emergency situation development and the deterioration of life safety in areas with disturbed ecological parameters of the geological environment. There is a need for artificial adjustment of the environmental forecast ecological parameters according to monitoring observations.

Keywords: deposit, salt brines, karst-suffusion process, emergency situation, water inflow.

Я. Малькова, асп.,
ORCID iD 0000-0002-6215-9901,
E-mail: malkovayanakiev@gmail.com;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
Е. Яковлев, д-р техн. наук,
ORCID iD 0000-0001-6562-4015,
E-mail: yakovlev1939@mail.ua;
В. Долин, д-р геол. наук., проф.,
ORCID iD 0000-0001-6174-2962,
E-mail: vdolin@ukr.net;
ГУ "Институт геохимии окружающей среды НАН Украины",
Пр. Акад. Палладина, 34, а, г. Киев, 03142, Украина

ЭКОЛОГО-ТЕХНОГЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РАССОЛА ДОМБРОВСКОГО КАРЬЕРА

Домбровский карьер, который эксплуатировался с 1967 г., единственный в мире, где открытым способом добывалась калийная руда. Рассматривается механизм формирования тела водно-солевых рассолов в Домбровском карьере и приведен краткий обзор проблем, возникших вследствие длительной разработки Калуш-Голынского месторождения калийных солей и накопления отходов в зоне гидравлически-геофильтрационного влияния производства. К таким проблемам относятся: затопление Домбровского соляного карьера, размыв солесодержащих отвалов атмосферными осадками, переполнение хвостохранилищ, загрязнение вод четвертичного надсолевого водоносного горизонта и опасность существенного ухудшения качества воды в городском водозаборе, развитие соляного карста и проседание земной поверхности над выработанным пространством шахт с деформацией или разрушением инженерных сооружений, жилых зданий и т. п. Проанализированы аналитические данные по динамике водопритоков в карьер и увеличения зоны дренирующего влияния прибортовой части карьера, что сопровождается осушением кольцевой дренажной траншеи – отрыв уровня подземных вод от ложа, развитием карстообразования по периферии карьера (до 250–350 м и более), аномальным увеличением глинисто-пылевых фракций в сточных водах карьера после наводнения 2008 г. с одновременным ростом водопритоков. Согласно исследованиям можно сделать выводы по разгрузке жидкого тела наполнения карьера в толщу галечников надсолевого водоносного горизонта, заполнение карстовых полостей, размывание бортов, рост объема чаши карьера и размера области дренирования грунтовых вод аллювиальных гравийно-песчаных отложений террас р. Сивка и Лимница.

На основе полученных результатов сделан вывод об угрозе развития чрезвычайной ситуации и ухудшения безопасности жизнедеятельности на территориях с нарушенными экологическими параметрами геологической среды. Существует необходимость искусственной корректировки прогнозных экологических параметров окружающей среды по данным мониторинговых наблюдений.

Ключевые слова: месторождение, соляные рассолы, карстово-суффозионный процесс, чрезвычайная ситуация, водоприток.

УДК 631.417.1+630*114.35

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.10>

С. Распопіна, д-р с.-г. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: s_raspopina@ukr.net,Харківський національний аграрний університет ім. В.В. Докучаєва,
п/в "Докучаєвське-2", Харківська обл., 62483, Україна

ЗАПАСИ ОРГАНІЧНОГО КАРБОНУ У БЛОЦІ "ПІДСТИЛКА – ҐРУНТ" СОСНОВОЇ ЕКОСИСТЕМИ ПОЛІСЬКОГО РЕГІОНУ

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

Показано результати досліджень вмісту та запасів органічного карбону у блоці "підстилка – ґрунт" соснових екосистем Житомирського та Чернігівського Полісся. Лісові екосистеми є важливими стабілізаторами циклу карбону і накопичувачами значних його запасів. Компоненти лісової екосистеми, пов'язані між собою потоками енергії й речовин. Зв'язування CO_2 у блоці "рослина-ґрунт" з подальшим перетворенням карбону в нерозчинні гумусові сполуки має особливе значення. У соснових місцезростаннях регіону досліджень найпоширенішими є дерново-слабо- і середньопідзолисті ґрунти на флювіогляціальних пісках, які належать до категорії староорних. Також представлені торф'яно-болотні ґрунти. Показано, що процес гумусонагромадження характеризується низькою інтенсивністю, що обумовлено комплексом причин, зокрема піщаною гранулометриєю дерново-підзолистих ґрунтів (вміст часток $< 0,01$ мм – 7,5 %). Потужність їхнього органопрофілю становить 18 см. Середній вміст гумусу – 0,97 %, а запаси – 28,3 т/га в шарі 20 см. Аналогічні показники карбону – 0,56 % і 16,4 т/га відповідно. Органічна речовина дерново-підзолистих ґрунтів досліджених місцезростань є стійкою до мінералізації й на доволі тривалій час вилучається з кругообігу речовин соснової екосистеми. Середній вміст карбону в гідроморфних органічних ґрунтах збільшується до 18,1 %, а його запаси – до 168,9 т/га. Здатність до мінералізації торф'яних ґрунтів нижча за дерново-підзолисті. Запаси соснової підстилки в середньому становлять 30–33 т/га, а запаси карбону – 12,6 т/га за доволі стабільного його вмісту – 40 %. Загальні запаси карбону у блоці "підстилка – ґрунт" типової соснової екосистеми Полісся становлять у середньому 29 т/га, при цьому основна їхня частина акумулюється в ґрунті. З огляду на те, що на неродючих ґрунтах Полісся формуються високопродуктивні соснові ліси, їхнє заліснення не тільки зупинить інтенсивну деградацію ґрунтів України, а й сприятиме збільшенню депонування парникових газів, тим самим привнесе певну частку в пом'якшення змін клімату на регіональному рівні.

Ключові слова: дерново-підзолистий ґрунт, підстилка, сосна звичайна, гумус, вуглець, мінералізація органічної речовини.

Постановка проблеми. Однією з найнебезпечніших екологічних проблем людства, на думку вчених, є глобальне та стрімке потепління клімату, спричинене антропогенними викидами в атмосферу парникових газів, насамперед CO_2 , а також SO_2 , NO_2 , CH_4 тощо. При цьому, якщо загальний баланс CO_2 у біосфері від природних процесів суттєво не змінюється, то його привнесення в атмосферу від антропогенних джерел невинно зростає, що в комплексі зі скороченням фотосинтезуючої площі через масові вирубки лісів, лісові пожежі, переведення зайнятих лісом територій в агроценози, призводить до так званого "парникового ефекту". Діяльність у лісовому секторі розглядається одним із дієвих інструментів для регулювання та пом'якшення змін клімату. Міжурядовою групою експертів з питань зміни клімату (МГЕЗК) запропоновано концептуальні та методичні підходи, якими слід керуватися під час оцінювання резервуарів і джерел емісії парникових газів у лісовому господарстві (*Greenhouse gas inventory workbook*, 1995). Одним з основних резервуарів карбону в лісовій екосистемі є ґрунт і підстилка.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Парниковий ефект утворюється внаслідок генерування парниковими газами теплової енергії шляхом повторної акумуляції інфрачервоного випромінювання з поверхні Землі (реабсорбція) та його часткового повернення в нижні шари атмосфери. Поточні оцінки показують, що протягом 2000–2030 рр. антропогенна емісія парникових газів зростає в межах від 25 до 90 % (*Climate-Smart Agriculture Sourcebook*, 2013; *Стратегія розвитку України...*, 2015). У поглинанні парникових газів, зокрема оксидів карбону та загалом у глобальному циклі карбону, лісові екосистеми, поряд із планктоном морів та океанів, виконують роль планетарного масштабу, накопичуючи близько половини його світових запасів. Так, тропічні ліси поглинають від 1,4 до 2,2 млрд т CO_2 (*Shimmel*, 2014). Щодо України, то, наприклад, ліси Українських Карпат, де зосереджено 22 % її лісового фонду, поглинають щорічно 14 т/га CO_2 і виділяють 8 т/га O_2 (*Протопопов*, 1975). Нині в Україні та загалом у світі до-

слідження балансу карбону в лісових екосистемах є особливо актуальними (*Букша та Пастернак*, 2005; *Букша та ін.*, 2012; *Noormets et al.*, 2007; *Shvidenko et al.*, 2008; *Лакида та ін.*, 2010; *Замолодчиков и др.*, 2014; *Le Quéré et al.*, 2016; *Lesiv et al.*, 2019; *Малышева и др.*, 2017). Загалом лісові екосистеми є важливим посередником між змінними потоками сонячної енергії й води, стабілізаторами циклу карбону, його нагромаджувачами і являють собою систему резервуарів, пов'язаних між собою відповідними потоками. Особливе значення має зв'язування CO_2 у блоці рослина – ґрунт з наступною трансформацією карбону в малорозчинні гумусові сполуки.

Участь ґрунтів у процесі передачі та стабілізації акумульованої сонячної енергії та речовин атмосфери в надра Землі вивчена недостатньо, хоч реальність цієї участі не викликає сумнівів. Так, якщо порівняти час перебування карбону в різних резервуарах геосфери, то, за розрахунками вчених, в атмосфері він становить 4 роки, біоті суші – 15, біоті океану – 0,04, а в ґрунті – 30 років (*Савенко і Самсонов*, 2017). При цьому близько 85–90 % запасів ґрунтового карбону зосереджено в гумусі – органічній речовині високого ступеня стійкості до розкладу, що є дуже важливим з точки зору його тривалого депонування та виведення з кругообігу речовин. За стійкістю до трансформації та періодом мінералізації органічної речовини ґрунтовими мікроорганізмами її поділяють на біологічно активний (лабільний, швидкий), повільний (проміжний) і пасивний (стабільний, інертний) пули (*Козут*, 2003). Час обігу органічних компонентів активного пулу оцінюють від декількох годин до 3–10 років, повільного – від 10 до 100 років, а пасивного – від 100 років до декількох тисячоліть. Загалом період оновлення гумусу верхніх горизонтів чорноземів становить 500–750 років, сірого лісового ґрунту – 280, а дерново-підзолистого – 50–75 років (*Ковда*, 1985; *Багаутдинов*, 1994). Загальна маса карбону, закріпленого у формі детриту і гумусу в сучасній педосфері, становить $2 \cdot 10^{12}$ т – це майже утричі більше, ніж в атмосфері та в чотири рази, ніж у біомасі надземної рослинності (*Базилевич*, 1979; *Глазовская*, 1996).

Значна частина запасів карбону зосереджена в лісах України, які розташовані дуже нерівномірно та переважно сконцентровані в Поліссі (рівень його лісистості – 26,8 %) і Карпатах (42 %) (*Лісове господарство України, 2018*). Зважаючи на те, що ліси є основними поглиначами CO₂ та посередниками між змінними потоками сонячної енергії й води на суходолі, особливо важливо оцінити пул карбону в лісових ґрунтах Полісся, які утворюють оптимальні умови для формування високопродуктивних лісів. Зауважимо, що ґрунт як резервуар карбону в лісовій екосистемі розглядається у комплексі з фітотритом, зокрема лісовою підстилкою.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Київським протоколом для розвинених країн і країн з перехідною економікою встановлено обов'язки щодо зниження викидів парникових газів. Україна є стороною Київського протоколу, який було ратифіковано в лютому 2004 р. Сфера його діяльності також охоплює моніторинг і прогнозування обсягів емісій та депонування карбону в секторі природокористування, зокрема лісового господарства. Складання інформативної бази даних щодо запасів карбону в різних компонентах лісової екосистеми на регіональному та національному рівнях є одним із пріоритетних завдань, оскільки ці дані є основними розрахунковими елементами, які використовуються під час складання національної звітності України, регламентованої вимогами МГЕЗК. Не зважаючи на численні дослідження з вивчення балансу карбону, які проводяться в Україні, для складання зазначеної звітності особливо бракує фактичних первинних даних щодо запасів органічної речовини, акумульованої в едафотопі лісових екосистем.

Мета дослідження полягала у визначенні вмісту і запасів органічного карбону у біомасі "підстилка – ґрунт" соснових екосистем Поліського регіону (на прикладі Житомирського та Чернігівського Полісся), а також потенційної здатності їхньої органічної речовини до мінералізації.

Основні результати дослідження. Дослідження проводили на землях державних підприємств (ДП) Житомирського обласного управління лісового та мисливського господарства (ОУЛМГ) (ДП "Малинське лісове господарство (ЛГ)"; ДП "Житомирське ЛГ"; ДП "Лугинське ЛГ" та Чернігівського ОУЛМГ (ДП "Корюківське ЛМГ"; ДП "Холминське ЛМГ"; ДП "Городнянське ЛМГ"; ДП "Семенівське ЛМГ"). В основу досліджень покладено базові положення лісової типології, лісівництва і ґрунтознавства. Дослідженнями було охоплено характерні соснові місцезростання, які представлені свіжими боровими (A₂) та свіжими субборовими (B₂) типами лісорослинних умов (ТЛУ), а також березові та чорновільхові місцезростання вологих і сирих субборових і сугрудових типів. На закладених пробних площах визначали запаси лісових

підстилок (ваговим методом) і проводили обстеження ґрунтового покриву з відбором зразків для аналізу. Аналітичні дослідження (щільність складення ґрунту на суху масу, вміст карбону в ґрунтах і лісових підстилках) проводили за загальноприйнятими методиками (ДСТУ ISO 11508:2005; ДСТУ 4289:2004). Запаси С органічних сполук розраховували для верхньої 20-сантиметрової товщі ґрунту, яка характеризується максимальною акумуляцією рухомого та стабільного карбону. Аналіз та узагальнення результатів проводили із застосуванням методів математичної статистики.

ґрунтового покриву дослідженого регіону сформувався під наметом хвойних (здебільшого соснових) лісів з підліском з листяних порід і чагарників і трав'яно-моховим надґрунтовым покриттям, а також під наметом мішаних хвойно-листяних і похідних листяних лісів з трав'яним покривом. Деревостани переважно представлені чистими одноярусними середньовіковими насадженнями сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.), у підрості подекуди зустрічаються береза повисла (*Betula pendula* Roth.), дуб звичайний (*Quercus robur* L.) та осика (*Populus tremula* L.), у підліску – крушина ламка (*Frangula alnus* Mill.), бузина червона (*Sambucus racemosa* L.), горобина звичайна (*Sorbus aucuparia* L.). Згідно з даними лісовпорядкування площа хвойних лісів у Чернігівському Поліссі становить 217 514 га, Житомирському – 395 987 га, серед яких абсолютно домінують соснові насадження – 98,3 та 98,8 % відповідно. Сосна характеризується високою продуктивністю – загальна частка деревостанів II та вищих класів бонітету становить 90 % (рис. 1, а). Серед високопродуктивних, переважають деревостани I класу бонітету – 42 %, частка сосняків I^a класу – 28 %, II – 20 % (рис. 1, б).

ґрунтове обстеження показало, що в зоні досліджень Житомирського та Чернігівського Полісся здебільшого поширені дерново-слабо- та середньопідзолисті глеюваті ґрунти на псевдофібрових флювіогляціальних пісках. У минулому ці ґрунти здебільшого використовували ву ріллі, отже, вони належать до категорії староорних. Зустрічаються також дернові, сірі лісові та торф'яно-болотні (мулуватоглейові, торф'яно-глейові, торф'яні) ґрунти.

Профіль досліджених автоморфних дерново-підзолистих ґрунтів має такий вигляд. Під підстилкою залягає гумусовий горизонт (He, HE), який подекуди, унаслідок колишнього використання ґрунтів у ріллі, характеризується специфічною морфологією. Так, навіть після 45–60-річного зростання лісової рослинності, на глибині 20–30 см діагностується похований орний шар. Він виглядає як нерівномірно гумусований суцільний прошарок потужністю 10–20 см або ж має рвано-плямисту форму, унаслідок чого нижня межа He (HE) горизонту є асиметричною та дещо розтягнутою.

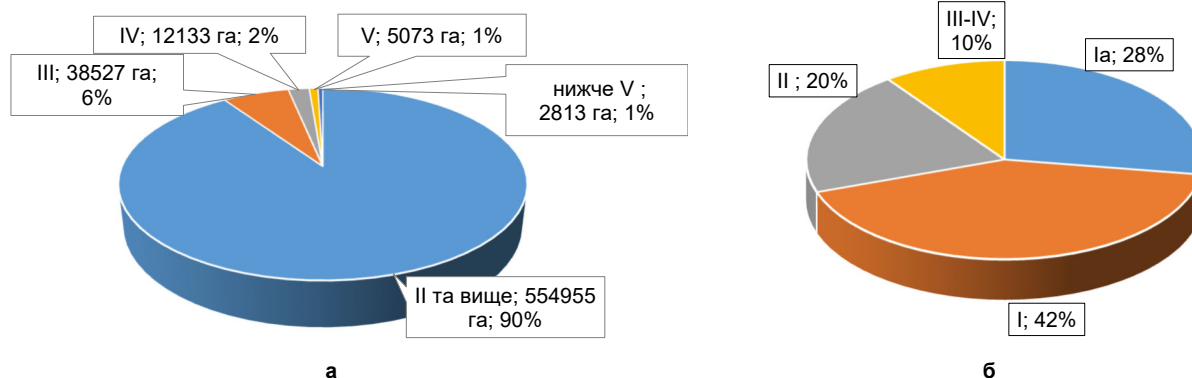


Рис. 1. Абсолютний та відносний розподіли площі соснових деревостанів за класами бонітету (а), а також у межах високопродуктивних деревостанів (I^a, I, II класи) (б) в умовах Чернігівського та Житомирського Полісся

Загальна потужність органографію варіює в межах від 3 до 35 см за його середнього значення $18 \pm 1,3$ см, тобто ґрунти за цією ознакою класифікуються як середньопотужні. Найбільш поширені ґрунти – з потужністю 11–15 см та 16–20 см, їхні частки становлять 40 та 24 % відповідно (від загальної кількості закладених ґрунтових профілів), а найменш – 35–40 см і до 5 см (їхні частки по 1 %), а також 31–35 см (5 %).

Процес гумусонагромадження у досліджених дерново-підзолистих ґрунтах характеризується вкрай невисокою інтенсивністю, що насамперед пояснюється їхнім

легким гранулометричним складом і безкарбонатністю, переважанням хвойної рослинності та промивним типом водного режиму. У гранулометричному складі домінує фракція дрібнозернистого піску – $57,9 \pm 3,2$ %, доволі значну частку займає крупний пісок – $29,8 \pm 3,4$ %, а сума часток $< 0,01$ мм (фізична глина) в органографії становить лише $7,5 \pm 0,4$ %, ($n = 132$). Вміст глинистих часток значною мірою впливає на такі показники гумусного стану, як гумусованість і потужність органографії (пряма кореляція середнього рівня, $t_{05} = 6,45$, $n = 89$) (рис. 2).

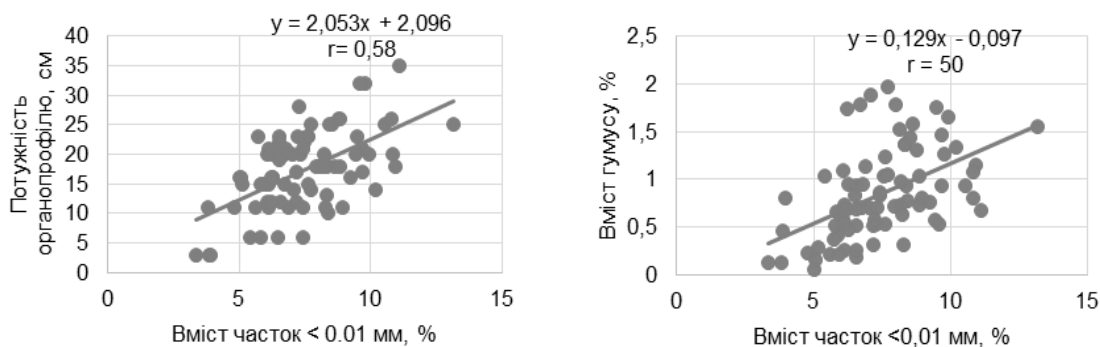


Рис. 2. Залежність деяких показників гумусного стану автоморфних дерново-підзолистих ґрунтів від вмісту часток $< 0,01$ мм в умовах Чернігівського та Житомирського Полісся

Профільний розподіл гумусу є таким, що різко зменшується з глибиною – у середньому від 1,40 % у Не-горизонті до 0,01 у Р₁h. Середній вміст гумусу в 20-сантиметровому шарі становить $0,97 \pm 0,10$ % ($n=89$), запаси – 28,3 т/га, а карбону 0,56 % та 16,4 т/га відповідно. Такий вміст гумусу характеризується як "дуже малий", а його запаси – "дуже низькі", тобто ці рівні ознак займають найнижчі щаблі в Системі показників гумусного стану ґрунтів (Орлов і др., 2004). Дуже важливим показником гумусного стану ґрунтів є збагачення гумусу на Нітроген, про яке свідчить співвідношення C : N. За цим показником оцінюють ступінь лабільності органічної речовини ґрунту. Середній вміст N у досліджених ґрунтах становить $0,04 \pm 0,005$ %, відповідно величина співвідношення C : N дорівнює 15,5 од. Отже, органічна речовина дуже збіднена на Нітроген, що, у свою чергу, свідчить про високу стійкість гумусу досліджених дерново-підзолистих ґрунтів до мінералізації та відповідно довготривалий стік карбону в соснових екосистемах Українського Полісся.

Потенційним джерелом гумусових речовин в лісовій екосистемі є органічна речовина всіх її складових, водночас найбільшою мірою у процес гуміфікації втягується рослинний опад, який трансформується в лісову підстилку. На поверхні ґрунту соснового лісу представлена підстилка, що складається із трьох підгоризонтів: лісовий нерозкладений опад (L; A₀¹); шар ферментації (F; A₀²) та гуміфікації (H; A₀³). На обстежених ділянках її потужність залежно від повноти деревостану, мікрорельєфу та внутрішньої парцелярної неоднорідності лісових ділянок варіює від 1 до 9 см та в середньому становить 4 см ($V = 16,7$ %, $\Delta x = 6,3$ %). Отже, лісова підстилка класифікується як середньопотужна (Орлов і др., 2004).

Загалом, якщо прийняти, що лісівничо-таксаційні характеристики соснового деревостану та клімато-едафічні умови, у яких відбувається розкладання фітодетриту у сосновому лісі однакові, то питома швидкість його розкладання залежить від біохімічного складу органічного матеріалу. За нашим оцінюванням, у вищезазначених свіжих борових та суборових типах соснових місцезростань дослідженої частини Полісся запаси підстилки є більш-менш подібними та коливаються в межах 30–33 т/га, а

вміст карбону становить $40 \pm 1,4$ %, відповідно його запаси у середньому становлять 12,6 т/га. Зважаючи на те, що вміст C у сосновій підстилці характеризується незначним варіюванням, його запаси більшою мірою залежать від запасів фітодетриту, ніж від його вмісту.

Загальні дані хімічного аналізу лісової підстилки свідчать про те, що з переходом від її верхнього (L) до нижнього (H) гуміфіційованого підгоризонту зменшується вміст органічних сполук, які входять до складу рослинних залишків (геміцелюлози, клітковини, лігніну), тоді як збільшується вміст специфічних ґрунтових органічних сполук гумусової природи (гумінові (ГК) та фульвокислоти (ФК), нерозчинний залишок). Центрами інтенсивної сучасної гуміфікації є зона переходу від нижніх підгоризонтів підстилки до мінеральних горизонтів органографії, оскільки саме тут зосереджений максимальний вміст гумінових кислот і найбільше значення співвідношення $C_{гк} : C_{фк}$ (Сапожнікова, 2000; Ведрова, 2005).

Згідно з літературними даними основна частина (80–90 %) органічної речовини підстилок мінералізується до CO₂ і повертається в атмосферу, а решта (10–20 %) трансформується в гумусові речовини (Mukhortova, 2005; Ведрова і др., 2018). Водночас, незважаючи на те, що мінералізація фітодетриту супроводжується синтезом гумусових речовин, до цього часу остаточно не визначено, яка саме частка карбону підстилки задіяна в процесі гумусоутворення. Це обумовлено низкою причин, зокрема участю багатьох компонентів у цьому процесі, диференціювання яких у натурі являю собою значні складнощі. Класиками лісового ґрунтознавства визначено, що між запасами опадів, підстилки та вмістом гумусу в дерново-підзолистих ґрунтах ялиників південної тайги в межах одного типу лісу існують дуже тісні кореляційні зв'язки ($r = 0,90 \pm 0,03$) (Карпачевський, 1981). За останніми дослідженнями, новоутворення гумусових речовин становить лише близько 1 % від загальної маси органічної речовини підстилки, яка бере участь у процесі розкладання (Ведрова і др., 2018).

Характерною особливістю підстилки соснових насаджень є вкрай незначна збагаченість на зольні елементи та Нітроген. Це обумовлено оліготрофністю сосни зви-

чайної, яка здебільшого зростає на найбідніших кварцових пісках. Так, серед основних поживних елементів найбільший вміст характерний для N, концентрація якого коливається в межах від 0,84 до 1,11 %, а середнє значення становить 0,95 %. Найменшу концентрацію – 0,076 % зафіксовано для фосфору за дуже незначного діапазону значень – від 0,07 до 0,09 %. Вміст калію займає проміжне положення між нітрогеном і фосфором – його середня концентрація становить 0,11 % за амплітуди від 0,1 до 0,13 %. Для соснових підстилок також характерний підвищений вміст сполук, які важко

гідролізуються, що разом із низькою збагаченістю органічної речовини на нітроген (C : N – 42 од.) обумовлює дуже повільну їхню трансформацію.

Таким чином, зважаючи на вказані вище запаси карбону в дерново-підзолистих ґрунтах, його загальні запаси у блоці "лісова підстилка – ґрунт" типової соснової екосистеми Житомирського та Чернігівського Полісся у середньому становлять 29 т/га (рис. 3). При цьому частка запасів C у ґрунті, навіть за умов дуже низького вмісту глинистих часток, яке має місце в ґрунтах борових місцезростань, є вищою за підстилку.

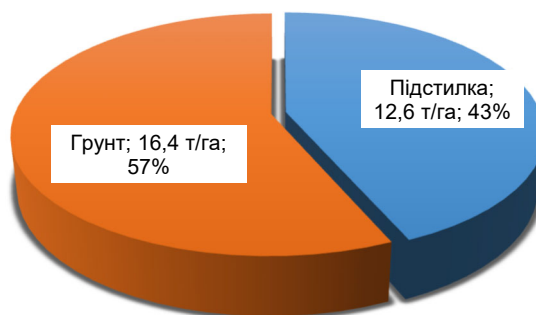


Рис. 3. Запаси (т/га) та частки (%) C у блоці "лісова підстилка – ґрунт" соснової екосистеми в умовах Чернігівського та Житомирського Полісся (ТЛУ A₂, B₂)

Комплекс природних умов Українського Полісся (доволі вологий клімат, слабокислотна рівнинна і низовинна поверхня) обумовлює високий рівень ґрунтових вод і формування різних комбінацій гідроморфних (мінеральних та органічних) ґрунтів у вологих і сухих типах суборевих і сугрудових місцезростань під березовими та чорновільховими деревостанами. Вміст карбону органічних сполук у гідроморфних ґрунтах (торф'яно-глеєвих, торф'яно-болотних) є вищим у рази та навіть десятки разів за автоморфні. Так, якщо загальний середній вміст C в органопротилі дерново-підзолистих ґрунтів зони досліджень становить 0,56 %, то в органічних підвищується до 18,1 %, що обумовлює збільшення запасів карбону до 168,9 т/га. Такий його вміст відповідає високому рівню (Орлов та ін., 2004). Зазначимо значне варіювання вмісту C у досліджених гідроморфних ґрунтах – від 0,1 до 38,4 %, водночас його загальні запаси залишаються високими і варіюють у межах від середнього (119,5 т C/га) до дуже високого рівня (248,4 т C/га). Зауважимо, що здатність до мінералізації торф'яних ґрунтів нижча, ніж дерново-підзолистих унаслідок незначної кількості в загальному складі їхньої органічної речовини тієї частки карбону, яка найближчим часом піддається мінералізації (1,7 %). Отже, торфові ґрунти характеризуються високою карбон-секвеструючою ємністю.

Одним із стратегічних завдань лісового господарства України на найближчу перспективу є збільшення лісистості території держави до оптимального рівня (20 %), яке досягається насамперед шляхом розширення робіт з лісорозведення, про що зазначено в "Стратегії реформування лісового господарства України на період до 2022 року". Для цього необхідно додатково заліснити щонайменше 2 млн га земель. Залісненню в першу чергу підлягають різні види малопродуктивних і деградованих земель. Дані, наведені у статті, свідчать, що на староорних дерново-підзолистих піщаних ґрунтах (які характеризуються дуже низьким рівнем родючості для абсолютної більшості сільськогосподарських культур) формуються високопродуктивні соснові ліси. Трансформація цих земель у лісові екосистеми сприятиме не тільки призупиненню інтенсивних деградаційних процесів, якими охоплена значна територія України, а й зростанню обсягів

депонування парникових газів, тим самим привнесе певну частку в пом'якшення змін клімату на регіональному рівні. Зауважимо, що саме в молодому віці лісові насадження є найбільш активними поглиначами CO₂. За загальними оцінками, у дерново-підзолистих слабогумусованих ґрунтах в екосистемі ялинового лісу (після лісовідновлення на землях колишнього сільськогосподарського користування) запаси карбону зростають із 30–40 т/га на стадіях ріллі або сінокосу до 150–230 т/га на стадії стиглого лісу (Чалай, 2012).

Висновки. Проведені дослідження дозволили встановити вміст і запаси органічного карбону у блоці "підстилка – ґрунт" типової соснової екосистеми, а також потенційну здатність їхньої органічної речовини до мінералізації в умовах Чернігівського та Житомирського Полісся.

У свіжих борових і суборевих умовах Житомирського та Чернігівського Полісся здебільшого поширено дерново-слабопідзолисті ґрунти на псевдофібрових флювіогляціальних пісках і дерново-середньопідзолисті глеюваті на піщаних відкладах. Профільний розподіл гумусу є таким, що різко зменшується з глибиною, середній його вміст у 20-сантиметровому шарі характеризується як "дуже малий" – 0,97 %, а запаси "дуже низькі" – 28,3 т/га. Аналогічні показники карбону становлять 0,56 % та 16,4 т/га відповідно. Органічна речовина автоморфних дерново-підзолистих ґрунтів соснових місцезростань є доволі стійкою до мінералізації та на тривалий час вилучається з кругообігу речовин соснової екосистеми. Показники їхнього гумусового стану – гумусованість і потужність органопротилі значною мірою визначаються вмістом часток фізичної глини.

У гідроморфних ґрунтах вологих і сухих типів суборевих і сугрудових березових і чорновільхових місцезростань середній вміст карбону підвищується до 18,1 %, а його запаси до 168,9 т/га. Здатність до мінералізації торф'яних ґрунтів нижча, ніж дерново-підзолистих унаслідок незначної кількості в загальному складі їхньої органічної речовини тієї частки карбону, яка найшвидше піддається мінералізації. Отже, торфові ґрунти мають високу карбон-секвеструючу ємність.

Підстилка досліджених соснових місцезростань характеризується середньою потужністю – 4 см та доволі

стабільним вмістом карбону – 40 %. Її запаси в середньому варіюють у межах 30–33 т/га, а запаси карбону становлять 12,6 т/га. Такі властивості соснової підстилки, як збагаченість на сполуки, що важко гідролізуються, а також бідність на Нітроген сприяють повільній їхній трансформації. Отже, загальні запаси карбону у блоці "підстилка – ґрунт" типової соснової екосистеми Житомирського та Чернігівського Полісся в середньому становлять 29 т/га, при цьому основна їхня частина акумулюється в ґрунті.

На староорних неродючих піщаних ґрунтах Поліського регіону формуються високопродуктивні соснові ліси (частка деревостанів II та вищих класів бонітету становить 90 %). Заліснення малопродуктивних і деградованих ґрунтів сприятиме не тільки призупиненню інтенсивних деградаційних процесів, якими охоплена значна територія України, а й зростанню обсягів депонування парникових газів, тим самим привнесе певну частку в пом'якшення змін клімату на регіональному рівні.

Список використаних джерел

- Багаутдинов, Ф.Я. (1994). Обновление компонентов гумуса серой лесной почвы и чернозема типичного при длительной гумификации меченых по углероду растительных остатков. *Почвоведение*, 2, 50–56.
- Базилевич, Н.И. (1979). Продуктивность, биогеохимия современной биосферы и функциональные модели экосистем. *Почвоведение*, 2, 5–21.
- Букша, І.Ф., Пастернак, В.П. (2005). Інвентаризація та моніторинг парникових газів у лісовому господарстві. Харків Вид-во ХНАУ.
- Букша, І.Ф., Распопина, С.П., Пастернак, В.П. (2012). Запаси органічного вуглецю у ґрунтах та підстилці на ділянках моніторингу лісів. *Лісівництво і агролісомеліорація*, 120, 106–112.
- Ведрова, Э.Ф. (2005). Деструкционные процессы в углеродном цикле лесных экосистем Енисейского меридиана. *Автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.16*. Красноярск.
- Ведрова, Э.Ф., Мухоморова, Л.В., Метелева, Л.К. (2018). Трансформация органического вещества подстилки в лесных культурах. *Лесоведение*, 1, 24–36. doi.org/10.7868/S0024114818010023
- Глазовская, М.А. (1996). Роль и функции педосферы в геохимических циклах углерода. *Почвоведение*, 2, 174–186.
- ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини. (2005). К.: Держспоживстандарт України.
- ДСТУ ISO 11508:2005. Якість ґрунту. Визначання щільності частинок. (2005). К.: Держспоживстандарт України.
- Замолотчиков, Д.Г., Грабовский, В.И., Курц, В.А. (2014). Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее. *Устойчивое лесопользование*, 2, 23–31.
- Карпачевский, Л.О. (1982). Лес и лесные почвы. М.: Лесная промышленность.
- Ковда, В.А. (1985). Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука.
- Когут, Б.М. (2003). Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах. *Почвоведение*, 2003, 308–316.
- Лакида, П.И., Василишин, Р.Д., Василишин, О.М. (2010). Надземна фітомаса та вуглецево-енергетичний потенціал ялицевих деревостанів Українських Карпат. Корсунь-Шевченківський: ФОП Гаврищенко В.М.
- Лісове господарство України (2018). Отримано з: <http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/archive/docview?typeld=118551>
- Малышева, Н.В., Моисеев, Б.Н., Филичук, А.Н., Золина, Т.А. (2017). Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода. *Лесной вестник*, 21(1), 4–13. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-4-13>.
- Орлов, Д.С., Бирюкова, О.Н., Розанова, М.С. (2004). Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов. *Почвоведение*, 8, 918–926.
- Протопопов, В.В. (1975). Средообразующая роль темнохвойного леса. Новосибирск: Наука.
- Савенко, В.С., Самсонов, А.Л. (2017). Новый механизм поглощения углерода. Отслеживание missing sink. Моделирование коэволюции природы и общества: проблемы и опыт. К 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Моисеева (Моисеев-100). *Труды Всерос. научн. конф. Отв. ред. И.Г. Поспелов*. М.: ФИЦ ИУ РАН, 370–382.
- Сапожникова, В.А. (2000). Особенности трансформации органического вещества в почвах сосновых биогеоценозов при различных экологических условиях. *Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16*. Москва.
- Стратегія реформування лісового господарства України на період до 2022 року. (2015). Отримано з: www.radakmu.org.ua/uk/news_and_report/1079.html.
- Чалая, Т.А. (2012). Запасы углерода в почвах и растительности постагрогенных ландшафтов Южной Тайги. *Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16*. Москва.
- Climate-Smart Agriculture Sourcebook – Module 1: Why Climate-Smart Agriculture, Fisheries and Forestry. (2013). Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/018/i3325e/i3325e.pdf>.

Greenhouse gas inventory workbook. (1995). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory* 1, 2, 3, 153, 189, 170.

Le Quéré, C., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Sitch, S., Korsbakken, J.I. et al. (2016). Global Carbon Budget. *Earth System Science Data*, 8, 605–649. <https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>

Lesiv, M., Shvidenko, A., Schepaschenko, D., See, L., Fritz, S. (2019). A spatial assessment of forest carbon budget for Ukraine. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24, 6, 985–1006. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9795-y>

Marschner, B., Kalbitz, K. (2008). Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. *European Journal of Soil Science*, 171, 111–124. doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x

Mukhortova, L. (2005). The Transformation of Plant Residues Under Different Tree Species in the Siberian Afforestation Experiment. In: Binkley D., Menyailo O. (Eds.) *Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change*. NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences, 55. Springer, Dordrecht.

Noormets, A., Chen, J., Crow, T.R. (2007). Age-Dependent Changes in Ecosystem Carbon Fluxes in Managed Forests in Northern Wisconsin, USA. *Ecosystems*, 10(2), 187–203. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9018-y>

Shimmel, D. (2014). Global Atmospheric Carbon Dioxide. NASA.

Shvidenko, A.Z., Schepaschenko, D.G., Vaganov, E.A., Nilsson, S. (2008). Net Primary Production of Forest Ecosystems of Russia: A New Estimate. *Doklady Earth Science*, 421A(6), 1009–1012. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08060330>.

References

- Bagautdinov, F.Ya. (1994). Renovation of Humus Components of a Grey Forest Soil and of a Typical Chernozem in the Course of Long-Term Humification of Carbon Labelled Plant Residues. *Soil science*, 2, 50–56. [in Russian]
- Bazilevich, N.I. (1979). Productivity and Biogeochemistry of Recent Biosphere and Functional Models of Ecosystem. *Soil Science*, 2, 5–21. [in Russian]
- Buksha, I.F., Pasternak, V.P. (2005). Inventory and monitoring of greenhouse gases in forestry. Kharkov: Publishing House of KhNAU. [in Ukrainian]
- Buksha, I.F., Raspopina, S.P., Pasternak, V.P. (2012). Carbon stock in soil and litterfall on forests monitoring plots. *Forestry and Forest Melioration*, 120, 106–113. [in Ukrainian]
- Chalaya, T.A. (2012). Carbon reserves in soils and vegetation of post-agroclimatic landscapes of South Taiga. *Extended abstract of Candidate's thesis (Biology)*. Moscow. [in Russian]
- Climate-Smart Agriculture Sourcebook – Module 1: Why Climate-Smart Agriculture, Fisheries and Forestry. (2013). Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/018/i3325e/i3325e.pdf>.
- Development Strategy of Ukraine "Ukraine 2020: National Modernization Strategy". (2015). Retrieved from http://www.radakmu.org.ua/uk/news_and_report/1079.html. [in Ukrainian]
- DSTU 4289: 2004. Soil quality. Methods for determination of organic matter. (2005). K.: State Consumer Standard of Ukraine. [in Ukrainian]
- DSTU ISO 11508:2005. Soil quality. Determination of particle density. (2005). K.: State Consumer Standard of Ukraine. [in Ukrainian]
- Forestry of Ukraine. (2018). Retrieved from <http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/archive/docview?typeld=118551>. [in Ukrainian]
- Glazovskaya, M.A. (1996). Role and Functions of the Pedosphere in Geochemical Carbon Cycles. *Soil Science*, 2, 174–186. [in Russian]
- Greenhouse gas inventory workbook. (1995). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory* 1, 2, 3, 153, 189, 170.
- Karpachevsky, L.O. (1982). Forest and forest soils. M.: Forest industry. [in Russian]
- Kogut, B.M. (2003). Principles and methods of assessing the content of labile organic matter in plowed soils. *Eurasian Soil Science*, 36 (3), 283–290. [in Russian]
- Kovda, V. A. (1985). Biogeochemistry of soil cover. M.: Science. [in Russian]
- Lakida, P.I., Vasilishin R.D., Vasilishin, O.M. (2010). Above-ground phytomass and carbon-energy potential of fir stands in the Ukrainian Carpathians. Korsun-Shevchenkovskyi: FOP Gavrischenko V.M. [in Ukrainian]
- Le Quéré, C., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Sitch, S., Korsbakken, J.I. et al. (2016). Global Carbon Budget. *Earth System Science Data*, 8, 605–649. <https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>
- Lesiv, M., Shvidenko, A., Schepaschenko, D., See, L., Fritz, S. (2019). A spatial assessment of forest carbon budget for Ukraine. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24, 6, 985–1006. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9795-y>
- Malysheva, N.V., Moiseev, B.N., Filipchuk, A.N., Zolina, T.A. (2017). The methods of carbon balance estimation in forest ecosystems and their application to calculate annual carbon sequestration. *Forestry Bulletin*, 2 (1), 4–13. doi: 10.18698/2542-1468-2017-1-4-13. [in Russian]
- Marschner, B., Kalbitz, K. (2008). Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. *European Journal of Soil Science*, 171, 111–124. doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x
- Mukhortova, L. (2005). The Transformation of Plant Residues Under Different Tree Species in the Siberian Afforestation Experiment. In: Binkley D., Menyailo O. (Eds.) *Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change*. NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences, 55. Springer, Dordrecht.
- Noormets, A., Chen, J., Crow, T.R. (2007). Age-Dependent Changes in Ecosystem Carbon Fluxes in Managed Forests in Northern Wisconsin, USA.

Ecosystems, 10(2), 187-203. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9018-y>

Orlov, D.S., Biryukova, O.N., Rozanova, M.S. (2004). Revised System of the Humus Status Parameters of Soils and Their Genetic Horizons. *Soil science*, 8, 918-926.

Protopopov, V.V. (1975). The environment-forming role of dark coniferous forest. Novosibirsk: Science. [in Russian]

Sapozhnikova, V.A. (2000). Features of the transformation of organic matter in the soils of pine biogeocenoses under various environmental conditions. *Extended abstract of Candidate's thesis (Biology)*. Moscow. [in Russian]

Savenko, V.S., Samsonov, A.L. (2017). New carbon uptake mechanism. Finding missing sink. *Proceedings of All-Russia scientific conference. I. Pospelov (Ed.). Co-Evolution of Nature and Society Modelling, Problems & Experience. Devoted to Academician Nikita Moiseev centenary (Moiseev-100)*. Moscow: FRC CSC RAS, 370-382. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/332736473>. [in Russian]

Shimmel, D. (2014). Global Atmospheric Carbon Dioxide. NASA.

Shvidenko, A.Z., Schepashchenko, D.G., Vaganov, E.A., Nilsson, S. (2008). Net Primary Production of Forest Ecosystems of Russia: A New Estimate. *Doklady Earth Science*, 421A(6), 1009-1012. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08060330>.

Vedrova, E.F. (2005). Destruction processes in the carbon cycle of forest ecosystems of the Yenisei Meridian. *Extended abstract of Doctor's thesis (Biology)*. Krasnoyarsk. [in Russian]

Vedrova, E.F., Mukhortova, L.V., Meteleva, M.K. (2018). Transformation of organic matter of litter in forest plantations. *Journal of Forest Science*, 1, 24-36. doi: 10.7868/S0024114818010023. [in Russian]

Zamolodchikov, D.G., Grabovsky, V.I., Kurtz, V.A. (2014). Carbon balance management of Russian forests: past, present and future. *Sustainable forest management*, 2, 23-31. [in Russian]

Надійшла до редколегії 15.03.2020

S. Raspopina, Dr. Sci. (Agri.), Senior Researcher,

E-mail: s_raspopina@ukr.net,

Kharkov National Agrarian University after V.V. Dokuchaev,
The village "Dokuchaevske-2", Kharkiv region, 62483, Ukraine

THE STOCKS OF ORGANIC CARBON IN THE BLOCK "LITTER – SOIL" OF POLISSIA REGION PINE ECOSYSTEMS

The results of studies of the content and stocks of organic carbon in the block "litter – soil" of pine ecosystems in Zhytomyr and Chernihiv Polissia are presented. The forest ecosystems are important stabilizers of the carbon cycle as well as stocks of carbon. The components of the forest ecosystem are interconnected by the flows of energy and substances. Binding CO₂ in the block of "plant-soil", followed by the transformation of carbon into insoluble humus compounds is of particular importance. In the research area sod - light-podzolic and sod-medium-podzolic soils on fluvio-glacial sands are mostly spread. These soils belong to the category of old arable ones. Present here are also peat – marsh soils. It is shown that the process of humus accumulation is characterized by low intensity, which is caused by a complex of reasons, in particular, the sandy composition of sod-podzolic soils (particle content < 0,01 mm – 7,5 %). The thickness of the profile humus portion is 18 cm. The average content of humus is 0,97 %, and reserves – 28,3 t/ha in a 20-cm layer. Similar indicators of carbon are 0,56 % and 16,4 t/ha, respectively. Organic substance of sod-podzolic soils of pine habitats is resistant to mineralization and for a long time is removed from the cycle of substances of the pine ecosystem. The average carbon content in hydromorphic organogenic soils increases to 18,1 % and its stocks are 168,9 t/ha. The ability for mineralization peat soils is lower than that of sod-podzolic soils. So, they have a high carbon sequestration capacity. Pine litter reserves on the average are 30-33 t/ha, and carbon reserves on the average are – 12,6 t/ha, with its stable content – 40 %. The total carbon reserves in the block "litter – soil" of a typical pine ecosystem of Polissia are on average 29 t/ha, with the bulk of them being concentrated in the soil. Considering that highly productive pine forests are formed on the infertile soils of Polissia, their afforestation will not only stop the intensive degradation of soils of Ukraine, but also will increase the deposition of greenhouse gases, which will help to prevent further climate change at the regional level.

Keywords: sod-podzolic soil, litter, *pinus sylvestris*, humus, carbon, mineralization of organic substance.

C. Распопина, д-р с.-г. наук, ст. науч. сотр.,

E-mail: s_raspopina@ukr.net,

Харьковский национальный аграрный университет им. В.В. Докучаева,
п/в "Докучаевское-2", Харьковская обл., 62483, Украина

ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В БЛОКЕ "ПОДСТИЛКА – ПОЧВА" СОСНОВЫХ ЭКОСИСТЕМ ПОЛЕССКОГО РЕГИОНА

Представлены результаты исследований содержания и запасов органического углерода в блоке "подстилка – почва" сосновых экосистем Житомирского и Черниговского Полесья. Лесные экосистемы являются важными стабилизаторами углеродного цикла и накопителями значительных запасов углерода. Компоненты лесной экосистемы связаны между собой потоками энергии и вещества. Связывание CO₂ в блоке "растение – почва" с последующим превращением углерода в нерастворимые гумусовые соединения имеет особое значение. В регионе исследований наиболее распространены дерново-легкоподзолистые и дерново-среднеподзолистые почвы на флювиогляциальных песках. Эти почвы относятся к категории старопахотных. Представлены также торфянисто-болотные почвы. Показано, что процесс гумусонакопления характеризуется низкой интенсивностью, что обусловлено комплексом причин, в частности песчаной гранулометрией дерново-подзолистых почв (содержание частиц < 0,01 мм – 7,5 %). Мощность органо-профиля составляет 18 см. Среднее содержание гумуса – 0,97 %, а запасы – 28,3 т/га в слое 20 см. Аналогичные показатели углерода составляют 0,56 % и 16,4 т/га, соответственно. Органическое вещество дерново-подзолистых почв, исследованных местообитаний, устойчиво к минерализации и на продолжительное время выводится из круговорота веществ в сосновой экосистеме. Среднее содержание углерода в гидроморфных органогенных почвах увеличивается до 18,1 %, а его запасы составляют 168,9 т/га. Способность к минерализации торфяных почв ниже, чем у дерново-подзолистых. В целом они имеют высокую карбон-секвестрирующую емкость. Запасы сосновой подстилки в среднем составляют 30-33 т/га, а запасы углерода – 12,6 т/га при его стабильном содержании – 40 %. Общие запасы углерода в блоке "подстилка – почва" типичной сосновой экосистемы Полесья составляют в среднем 29 т/га, при этом основная их часть сосредоточена в почве. Учитывая, что на неплодородных почвах Полесья формируются высокопродуктивные сосновые леса, их облесение не только остановит интенсивную деградацию почв Украины, но и будет способствовать увеличению депонирования парниковых газов, что поможет предотвратить изменение климата на региональном уровне.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, подстилка, сосна обыкновенная, гумус, углерод, минерализация органического вещества.

UDC 556.3: 631.16

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.11>

A. Rokochinskiy, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
E-mail: a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua,
National University of Water and Environmental Engineering,
11 Soborna Str., Rivne, 33000, Ukraine;
O. Shevchenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof., Senior Researcher,
E-mail: shevch62@gmail.com,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
P. Volk, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
E-mail: p.p.volk@nuwm.edu.ua,
V. Turchenyuk, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Assoc. Prof.,
E-mail: fwg@ukr.net,
R. Koptjuk, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
E-mail: r.m.koptjuk@nuwm.edu.ua,
L. Volk, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
E-mail: l.r.volk@ukr.net,
National University of Water and Environmental Engineering,
11 Soborna Str., Rivne, 33000, Ukraine

HYDROGEOLOGICAL ACTION OF DRAINAGE AND DRAINAGE SYSTEMS OF POLISSIA ZONE IN CHANGING CLIMATIC CONDITIONS

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

We have analyzed various methods and models for determining and calculating drainage module. The drainage module is an important indicator of the hydrogeological effect of drainage and soil drainage. For the calculation of the drainage calculation module, an empirical, analytical, water-balance method is used, or it is accepted on the recommendations without sufficient economic and environmental justification. This does not meet the modern requirements for the creation and operation of such objects. Traditionally, the designs and parameters of agricultural drainage are determined by the drainage module. It provides the necessary conditions for the removal of excess moisture of the active soil layer in the spring (as the main calculation) and corresponds to a certain level of the calculated security of the formation of the runoff hydrograph. According to the generalized results of the research, in the calculation of drainage parameters, the values of drainage modules were taken within: for mineral soils – 0.4... 0.6 l/s·ha, for peat soils 0.2... 0.6 l/s·ha. These recommended values are not correct because then the defined drainage parameters take into account only the technological conditions of its operation. But this does not take into account the conditions of formation of economic and environmental effect within the system, and they are not economically and environmentally optimal for the calculation of the drainage system and its elements. We have performed research and evaluation of the hydrogeological effect of the drainage and drainage systems. The results of these researches showed the variability of values of drainage modules in time and space. We have also identified many influencing factors and confirmed their difference with the calculated value. A new evaluation of the effectiveness of drainage systems and the calculation of drainage modules are proposed. This evaluation includes the yield criterion for variable natural (climatic) and agricultural conditions. New optimal values of drainage modules are proposed. These values are also presented for critical conditions (maximum daily rainfall of different levels of probability).

Keywords: hydrogeological action of drainage, drainage systems, changing climatic conditions.

Problem formulation and critical review of research on the topic. As the practice and experience of technological and design solutions show in creation and operation of drainage systems (DS) and their main regulating elements (main channel, channel and side network manifold and, drainage, etc.), their future efficiency is determined by the drainage module that provides the necessary conditions for removal of excess moisture from the active layer of the soil in the spring (as the main calculation module) and corresponds to a certain level of stock calculation in hydrograph runoff formation. However, it does not always make it possible to reach the project level of economic and environmental efficiency of the drainage operation and affects its overall cost. It is known that different drainage intensity due to hydrogeological drainage action (reduction of ground water level (GWT), regulation of soil moisture, volume and time of water withdrawal etc.), by the close nature conditions, creates uneven hydrogeology, reclamation status and the fertility of the land also the resulting deviations from the optimal yield. In its turn, drainage runoff and the drainage runoff module as its defining characteristic is the main indicator of hydrogeological drainage action and is one of the main alongside with the total evaporation, which is the cost element of drained soils water balance.

Therefore, there is a need to study the question of conditions formation, drainage modules identification and substantiation that decisively influence on area drainage ability which are under DS service.

According to the practice and experience gained from the drainage development, as well as from a worthy analysis of literature sources and researches, different methods and

models are used in the drainage calculations to determine the drainage runoff module, as a whole they are empirically, analytically, water-balanced determined or accepted according to recommendations without sufficient economic and environmental substantiation, which does not meet the modern requirements in the creation and operation of such facilities.

In 1913 to design drainage systems the calculating norm of runoff of 0,16 l/f·ha was accepted.

In 1918 A.D. Dubah, based on the general Burkley-Zieg-

ler formula $q = \frac{A}{\sqrt[3]{F}}$, where F is the drainage area (ha),

gave his first calculating runoff formula for the design of drainage channels. To determine the constant values A and x A.D. Dubah has chosen runoff norms adopted in the draft regulation of rivers Pticha, Ippy and Stubla.

For computation of calculated drainage module B.G. Heitman and H.A. Pisarkov proposed such an empirical formula

$$q_0 = \frac{CH^2}{B^2}, \quad (1)$$

where H – pressure, the value of which depends on the required rate of groundwater reduction; B – distance between drains; C – is an empirical coefficient that depends on the type of soil (Heitman, Pisarkov, 1955).

Kostyakov A.M., based on the dynamics of groundwater supply due to the seepage precipitation, proposed to determine the calculated drainage module according to the formula (Kostyakov, 1960):

$$q = \frac{X \cdot \eta}{864 \cdot t \cdot \beta}, \quad (2)$$

where X – precipitation number (mm) over time t (days); η – absorption coefficient; β – coefficient that depends on the rate of water seepage into the soil and the rate of decrease in GWT;

The calculations according to formula (2) can be performed only having the data of the empirical coefficients η and β . At the same time, the calculated dependence, by Kostyakov A.M., does not take into account moisture evaporation costs which leads to a significant overestimation of the values of the calculated drainage runoff module. It is the evapotranspiration, in the current situation of global warming and increasing critical depth of the GWT (Shevchenko, 2019), becomes chief external natural regulator of drainage runoff on drying-moisturizing systems.

Yangol A.M. recommended to consider the impact of evaporation on moisture that infiltrates on the groundwater level, using the certain coefficient (k_0) and for the Ukraine conditions the next empirical formula should be taken:

$$q_x = q_0 \cdot k_0 \cdot k_p \cdot k_B, \quad (3)$$

where q_x – the calculated drainage module; q_0 – run off module from the land, depending on the profile of its usage, for example, under arable land and spring pastures – 0,61 l/s·ha; for hayfields and summer pastures – 0,52 l/s·ha; for gardens – 0,70 l/s·ha, etc; k_0 – coefficient that depends on the annual precipitation; k_p – coefficient that depends on the distance between the drains; k_B – is the coefficient that depends on the water permeability of the soil (Yangol, 1970). However, k_0 does not take into account the differentiation of evaporation by landscape and climatic conditions.

Similar equation recommends Shkinkis Ts. N. (Shkinkis, 1981), but for the conditions of the Latvian SSR with prevalence of mineral soils:

$$q_x = q_p \cdot k_d \cdot k_{tB} \cdot k_f, \quad (4)$$

Where q_x – is the average drainage module of the calculated period at certain depths for the laying drains t and

distance between drains B ; k_d – coefficient that depends on climatic conditions; k_{tB} – coefficient that depends on t and B ; k_f – coefficient that depends on the soil conditions for this republic.

A.I. Ivitsky in his scientific work "Fundamentals of design and calculations of Polissya drainage systems" (Ivitskyi, 1981) on the basis of obtained data and theoretical background, suggested such dependencies for runoff modules during sowing period:

a) without taking into account the slope of the flow:

$$q = \sigma \sqrt{h_n^3} \cdot \sqrt{F} \cdot \delta; \quad (5)$$

b) taking into account the slope of the flow:

$$q = \frac{\sigma_0 \sqrt{h_n^3} \cdot \sqrt{F} \cdot \delta}{\sqrt[5]{I}}, \quad (6)$$

where q – is the average long-term module of the sowing period in l/sec/km²; σ and σ_0 – coefficients equal to:

$\sigma = 0,00316$ and $\sigma_0 = 0,00224$; h_n – surface flow of spring flood in mm, determined by the map; F – water intake area in km²; I – slope of the flow in ppm Yah; δ – coefficient which accounts the influence of wetlands and forest cover on the sowing runoff for which such expression is found

$$\delta = \sqrt[4]{\beta + \lambda + 1}, \quad (7)$$

where β – is the wetland of the water intake in %; λ – forestry in %.

It is interesting to note that A.I. Ivitsky obtained a direct dependence of the seeding module from the size of the water intake area.

According to research of Tumas P.A. (1975) drainage module formation on loamy soils is very complex. As a rule, a more permeable layer is located at the top of the soil. The impact of this layer on the drain's runoff formation can be depicted by two 'tier model which is based on approximation of drain function of two lines with a fracture on the sole more permeable upper layer of soil (Fig.1).

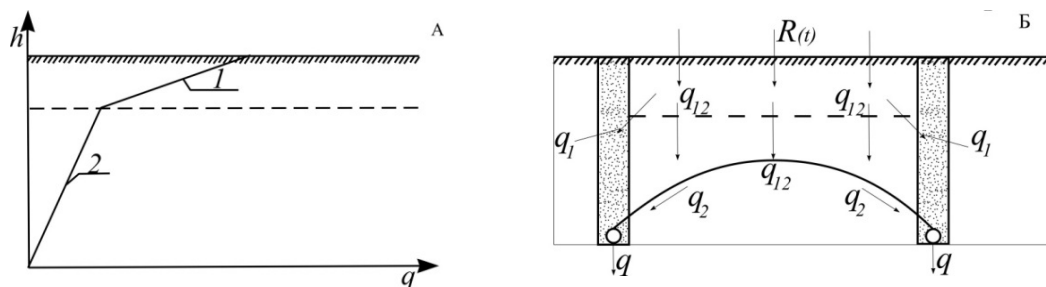


Fig. 1. The calculated scheme of the two-tier runoff model

This model, when forming the drainage module, describes the passage of moisture through two tiers (Fig. 1 A), within which the runoff can be shown by linear models:

$$\begin{cases} \frac{1}{\beta_1} \frac{dq_1}{dt} = R_{(t)} - q_1 - q_{12}; \\ \frac{1}{\beta_2} \frac{dq_2}{dt} = q_{12} - q_2; \\ q = q_1 + q_2. \end{cases} \quad (8)$$

The solution of the system of equations (8) makes it possible to determine:

$$q_1 = R_{(t)} \left[(1 - e^{-\beta_1 t}) + a(e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}) \right] + q_{t-1} \left[e^{-\beta_2 t} + b(e^{-\beta_2 t} - e^{-\beta_1 t}) \right], \quad (9)$$

$$\text{where } q_{12} = aR_{(t)}, \quad q_{2t-2} = bq_{t-2} \quad (10)$$

$R_{(t)}$ – is the effective rainfall minus surface runoff, a – is the coefficient characterizes the fraction of effective rainfall discharged through the lower soil layer; b – coefficient characterizes the share of lower tier runoff in the total runoff (for the

previous day); β_1, β_2 – empirical coefficients of drainage, describe its work by operation intensity of groundwater in the corresponding layers 1/day.

Calculated drainage module, given in the current standards in most countries of Western Europe, USA, Japan and others is determined by the analytical method. The above-mentioned principle was followed by A.M. Kostyakov, V.G. Heitman and H.A. Pisarkov, A.I. Ivitsky, S.F. Averyanov et al.

In its turn, the analysis of this method shows that, depending on the soil and climatic conditions, the drainage module is accepted in drainage calculations within 0,4...0,9 l/s·ha, decreasing to 0,3...0,6 l/s·ha for the south of Ukraine and increasing to 0,7...0,9 l/s·ha for the north and areas with average annual rainfall of 700...800 mm or more (Ivytskyy, 1981).

Due to the more intensive use of agriculture on drained lands, widespread use of farming practices and with transition of the upper layer large part runoff to the drainage one, at the end of 70–80 years a tendency to increase the value of calculated drainage modules appeared. Similarly, in the Latvia's current regulations the meaning of drainage module was increased up to 0,7...0,8 l/s·ha (Lukianas, 1975, Lukianas and Ruminaite, 2009, Miseckaite and Gurlkys, 2011).

To compare all the above mentioned, we note that the calculated drainage module in Western Europe countries was accepted within 0,8...4,8 l/s·ha, with higher values 2...4 l/s·ha specific to foothills areas and mountainous provinces with annual rainfall over 1000 mm. (Zemes 1995, Morkunas and Ramoska, 2001, Schultz B and De Wrachien D. 2002).

According to the German standard, drainage runoff modules for collector's diameter hydraulic calculation and the distance between the drains are calculated on average annual rainfall and are accepted within 0,8...2,0 l/s·ha. Among European countries, the largest calculated runoff modules are accepted in Sweden - 7 l/s·ha (Schrader, 1970, Sileaka et al., 2003, Wesstrom et al., 2001.).

In USA regulations calculated drainage runoff module depending on the type of soil, crop rotation and conditions of the surface water flow is taken also within 0,8...4,0 l/s·ha. In Japan, German standards have been accepted, they were recalculated on average annual rainfall of 1000...2800 mm, 2,0...5,0 l/s·ha (Engelsmann, 1978).

In Belarus drainage is allowed for a full section only for 2 days, which corresponds to 0,5 % of the average daily modules probability. As a result, the following drainage runoff modules that correspond to estimated probability are recommended: by the distance between drains in $B = 10$ m $q_0 = 0,82$ l/s·ha; $B = 14$ m, $q_0 = 0,68$ l/s·ha; $B = 20$ m, $q_0 = 0,48$ l/s·ha (Likhachevich, 2001). The calculated percentage of fullness is thus subjectively selected, without sufficient economic and, moreover, environmental substantiations. This module thus obtained has a distinct regional character. There is no such substantiation in Ts.N. Skinkis, who for the conditions of Latvia accepts q_p equals to 2 % fullness of the year, or for the duration of the period of drying 7 days.

The disadvantage of the empirical method of determining the calculated drainage module is the approximate nature of making amendments which consider the peculiarities of the natural conditions of the drainage object and the inability to consider the full range of variable weather and climatic conditions and consequently, the possible calculated drainage modules.

Scientists point to a methodological error that is allowed in the full-scale determination of the calculated drainage module. Due to large stochastic variability of soil properties and their moisture conditions to estimate empirical values of the

calculated drainage module long term monitoring of water regime of drained lands including drainage runoff are needed. By analogy with hydrogeological observations of river runoff, which is formed under the influence of similar natural factors, to determine drainage runoff 5...20 % fullness with an accuracy of not less than 20...25 % observations for 15–20 years are needed. These long-term observations are time consuming and require significant financial costs.

In this regard, at the time analytical method for determining the drainage module, based on the determination of the amount of water withdrawn for a certain time took advantage. This principle was put as the basis of the Silesian Instruction of 1957.

Currently, the most reasonable is recognized *water-balance method* of evaluation of the calculated drainage module, which is equivalent to the average daily intensity (calculated fullness) infiltration water intake to the dryers. The average daily inflow of water to the drains during the estimated period of drainage is determined by the formulas:

- when waterlogging caused by high standing GWT:

$$q = \frac{H_p}{T_p}; \quad (11)$$

- in case of intensive groundwater inflow into the drained area and from the external catchment area:

$$q = \frac{H_p}{T_p} + K_c I_c; \quad (12)$$

- with waterlogging, the challenge but the city of high standing GWT:

$$q = \frac{H_p}{T_p} + K_n I_n, \quad (13)$$

where H_p – the calculated height of a layer of water of a given fullness, which must be withdrawn during the calculation period; T_p – time for which the water layer should be removed; H_p, K_c – the average filtration coefficient of the water-bearing soil layer, m/day; K_n – the coefficient of filtration of soils lying above the aquifer, in which the drain is laid and the bottom surface or sole of the upper well permeable layer; I_c – intensity of inflow of soils of their waters and from the external catchment area; I is the gradient of the upward flow.

In this case, with the daily inflow of water to the drains during the billing period in all known formulas has an element of subjectivism. The latter is to determine the height of the soil layer from which water should be withdrawn during the billing period. It is considered that water is drawn from the soil surface layer to the drainage norm, although this position may not be observed if there are other elements of the drainage network, such as open channels.

On the other hand, in some years the latter is possible, but partial losses of the crop may be ecologically justified by lower capital costs for the construction of the DS. In addition, a layer of water remaining on the surface after the rise of meltwater, snow melting or heavy rainfall is accepted as a standard. The position is not taken into account when the maximum runoff and, accordingly, the minimum depths of groundwater can be observed much earlier than the seeding runoff and that even with a reduced degree of drainage, the DS can provide the required drainage norm. It is also very approximate, without sufficient reasons, the time for which the required layer of water should be removed is accepted too.

The disadvantage is also exists in the approximate nature of the estimation of the probability of precipitation and evaporation, and the lack of consistency of the calculated provisions that make up the water balance equation.

Therefore, considering calculating distances between systematic horizontal drainage O.I. Oliynyk and V.L. Polyakov defined drainage module (q , l/s·ha) through the intensity ε (m/day) by such dependence (Olejnik and Polyakov, 1987):

$$q = 116 \cdot \varepsilon \quad (14)$$

The actual value is expressed as follows:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{inф}} - \varepsilon_{\text{евп}}, \quad (15)$$

where $\varepsilon_{\text{inф}}$ – is the intensity of the total infiltration feed; $\varepsilon_{\text{евп}}$ – intensity of total evaporation from the groundwater surface (amount of evaporation and transpiration).

Peculiarity of drainage calculations is fandangoing for the distance between drains on known (given) module of drainage runoff (intensity of infiltration ε), depths for laying drains, allowed GWT depths reduction on inter drained and lithology drained aquifers thickness.

According to SBN.2.4-1-99 "Reclamation Systems and Structures" (1999), the values of drainage modules q (m/day) are taken on the basis of regional ones or determined by the formula:

$$q = \frac{W}{t}, \quad (16)$$

where t – is the time of decrease of GWT to the standard of drying, days; W – water's layer subjected to withdrawal (m), is defined by the equation:

$$W = h_s + J_{nd}\mu + P - Et, \quad (17)$$

where h_s – is the layer of water remaining on the surface after the flow of spring or storm water (taking into account the measures for the organization of surface runoff is assumed to be 0,01 m).

For the calculation the parameters of the combined drainage-accumulation system Kozhushko L.F. defined the general module by the following formula:

$$q_i = q_{Hi} + q_{ai} + q_{ei}, \quad (18)$$

where q_{Hi} – module flow value of lower tier tube drains q_{ai} – including part of a total drainage flow module that accumulates in the upper tier, q_{ei} – value module runoff of the upper tier, l/s·ha (Kozhushko, 2001).

Water-balanced method for determining the drainage flow module was improved by Muranov V.G. (Lazarchuk, Rokochinskii, Muranov, 2000) on the basis of the dependencies of O.D. Antonova (Antonov, 1974). The essence of this approach is to determine the calculated (optimum) value of the drainage module, which is accepted for each specific crop with the appropriate economic substantiation in the range from 0,1 to 2,0 l/s·ha with a step change of 0,1 l/s·ha, keeping the technological requirements (drainage of water in the spring period under the conditions of formation of the flow hydrograph of the corresponding calculated provision for drainage – from 2...5 to 10% provision regarding the calculated drainage flow module).

In general, the volume of water to be removed is determined by the equation

$$W = W_{\text{IOB}} + W_{\text{ГВ}} + W_{\text{OC}} + W_{\text{ГР}} - W_E, \quad (19)$$

where W_{IOB} – the layer of water remaining on the surface after the snow melts; $W_{\text{ГВ}}$ – a layer of water that is removed from the soil when the GWT is reduced; W_{OC} – layer of precipitation during the billing period; $W_{\text{ГР}}$ – groundwater inflow from the surrounding area; W_E – a layer of water that has evaporated during the billing period.

In retrospective calculations, drainage flow module values were set q_i between 0,1 and 2,0 l/s·ha. The time required for reduction of GWT to on soils in spring calendar year, determined by every day calculation, based on the prediction, that the volume of water to be withdrawn equals draining capacity, considering module q_i

$$W_{i,\mu,n} = q_i \theta_{i,\mu,n}, \quad (20)$$

where $W_{i,\mu,n}$ – is the volume of water to be discharged in the calendar year n , in the drainage flow module q , on soils with their own water output μ ; $\theta_{i,\mu,n}$ – the time required to decrease GWT from H_H to H_K a calendar year n if drainage is calculated by module q_i

Possible sowing period following the decline of GWT to normal drainage H_H since full soil thawing I took 3–5 days and during evaporation during $\theta_{i,\mu,n}$ exceeds precipitation on 15...20 mm (Antonov, 1974).

Thus, by the general results of previous studies for the Ukraine Polissya Zone in the calculation of drainage parameters module values of drainage runoff are adopted within: for mineral soils 0,4 ... 0,6 l/s · ha, in peaty soils 0,2 ... 0,5 l/s · ha. In its turn, these recommendations, as calculated, did not justified them selves so as defined by them drainage parameters account only the technological conditions of its work. However, the conditions for the formation of an economic and absolutely ecological effect are not sufficiently taken into account, that is, they are not economically and ecologically optimal for the calculation of DS as a whole (Rokochinsky, Volk et al., 2011, 2019).

For existing drainage and for that which is under project, the requirements for the forecasts are different and depend on the natural depth of the groundwater, drainage level, which is characterized as a rule, only through the drainage module and displays only soil drainage ability.

The hydrogeological effect of drainage and drainage ability, in contrast to the approaches mentioned above, can be considered as the natural or artificial withdrawal intensity of water from the estimated layer of soil or a certain area and to evaluate it by the indicators and parameters of the corresponding values of the drainage module. Therefore, there is an objective need to consider not only drainage and DS in general, when the drainage module reflects drainage ability of a certain drained territory taking into account channels and wired network, variable climatic, hydrogeological, agronomic, technological, technical, economic and environmental conditions as well as the type, value, productivity and profitability of cultivated agricultural crops (Volk, Rokochynskyy, 2011).

The purpose of the work: investigate the changes in the conditions of formation of drainage modules and their parameters under variable natural and agricultural land in order to clarify their calculated values in the design of reconstruction projects and new construction of DS.

Outline of the main material.

To accomplish this task, a large-scale computer-based experiment on an accelerated time scale was planned and carried out. The experiment is based on a set of forecasting-imitation models regarding the basic structural and technological variables of the DS, climatic conditions of the terrain, water regime, technologies of water regulation (drainage) and productivity of the drained lands for the schematized natural, agro-technical and reclamation conditions. The model was developed at the Department of Water Engineering and Water Technology at the National University of Water and Environmental Management. Their practical

application is regulated by the relevant industry standards of the State Agency of Ukraine (Rokochinsky et al., 2010).

Model of predictive assessment based on long-climatic conditions of the area allows you to get a typical distribution of major metrological factors (precipitation amounts, average values of temperature deficit and relative humidity), to adopt the ten-day cross section characteristic (calculated) as for heat and moisture supply during vegetation periods (Rokochinsky, Stashuk, 2008).

$$\bar{x}_{j\tau} = (\bar{P}_{j\tau}, \bar{T}_{j\tau}, \bar{D}_{j\tau}, \bar{H}_{j\tau}), f = \overline{1, n_f}; j = \overline{1, n_j}; \tau = \overline{1, n_\tau}, (21)$$

where $\bar{x}_{j\tau}$ – the state vector (data sets) of the main metrological factors together $\{f\}$, $f = \overline{1, n_f}$, ($n_f = 4$): amounts of rainfall $\bar{P}_{j\tau}$ (mm), the mean values of temperature $\bar{T}_{j\tau}$ (°C), deficit $\bar{D}_{j\tau}$ (mm) and relative humidity $\bar{H}_{j\tau}$ (%) – with estimated time intervals (day, pentad, decade) together $\{\tau\}$, $\tau = \overline{1, n_\tau}$ during the vegetation season (April-October) j – years of observations together $\{j\}$, $j = \overline{1, n_j}$.

The model of water regime and water regulation technology is based on the use of the usual "simple" equation of water balance in the integral form for the calculation layer of soil (CLS) $h = 0,5$ m on the adopted scheme, structure of calculations and the step of its discretization and allows to evaluate the mode and technological parameters with water regulation of drained land for multiple changing conditions of real object including, an assessment of drainage and DS in general by drainage module as for the different levels of its efficiency (Rokochinsky, Stashuk, 2011).

To accept structure of calculations and a given discretization step τ , $\tau = \overline{1, n_\tau}$ (pentad, week, decade – according to the implementation of the model of meteorological regimes) the model is as follows:

$$\begin{cases} Wh_\tau = Wh_{\tau-1} + P_\tau - E_\tau \pm Vh_\tau + m_\tau, \tau = \overline{1, n_\tau}, m^3/ha; \\ Hg_\tau = Hg_{\tau-1} \pm \Delta Hg, \tau = \overline{1, n_\tau}, m, \end{cases} (22)$$

where in model (22) Wh_τ , $Wh_{\tau-1}$ are the corresponding reserves of productive moisture of the CLS at the end of the estimated current τ and previous ($\tau-1$) time intervals, at a given initial value Wh_0 , P_τ – effective precipitation over time τ ; E_τ – the corresponding value of the total evaporation; Vh_τ – the amount of moisture exchange of the CLS h with the lower layers and GWT in the form of power (+) VVh_τ or infiltration infiltration (–) Vh_τ ; m_τ – irrigation rate with the appropriate method of moistening; Hg – depth of groundwater; ΔHg – change in groundwater level over time τ .

The model of effective yield on dehumidified lands is based on models of local climatic conditions, water regime and water management technologies, also allows to determine yields by the long-term forecast. This model is presented in the form of a complex model of multiplicative type, which is expressed through the product of functions of influence of determining factors on the formation of the crop by the system of corresponding coefficients (Rokochinsky and Shalay, 2017).

$$Y_{k\omega sp} = Y_{\omega kp}^F \cdot \prod_{i=1}^{n_i} K_i = Y_{\omega kp}^F \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6,$$

$$i = \overline{1, n_i}, (23)$$

where $Y_{\omega kp}^F$ – climatically provided yield during the vegetation period k -culture; K_1 – coefficient of decrease in yield by soil bonus g ($0 \leq K_1 \leq 1$); K_2 is the coefficient of increase in the yield by the introduction of fertilizers ($K_2 > 1$ but $0 < K_1, K_2 \leq 1$); K_3 – the coefficient of decrease of yield at deviation of sowing period or renewal of vegetation from the optimum ($0 \leq K_3 \leq 1$); K_4 – coefficient of influence of current natural reclamation conditions (climate ω , p and water regulation technologies s) of the period of vegetation of the crop on the formation of yield ($0 \leq K_4 \leq 1$); K_5 is the coefficient of decrease of yield at deviation of the harvesting period from the optimum ($0 \leq K_5 \leq 1$); K_6 is the coefficient of yield reduction due to losses during collection and transportation ($0 < K_6 \leq 1$).

The machine experiment based on predictive-simulation modeling was performed under the conditions and averaged data of climate change (meteorological stations or posts in the West Polisia zone of totality $\{\omega\}$, $\omega = \overline{1, n_\omega}$; the periods calculated on the terms of heat and humidity of vegetation of the totality $\{p\}$, $p = \overline{1, n_p}$ very wet periods ($p = 10\%$), wet periods ($p = 30\%$), average-wet periods ($p = 50\%$), dry periods ($p = 70\%$), very dry periods ($p = 90\%$); for the two main most common types of soil in the Polesia region of Ukraine: sod-gleyed sandy-loam soils ($k_\phi = 0,8$ m/day) and peat soils ($k_\phi = 0,4$ m/day); culture of project crop-rotation: winter wheat with yield (40 c/ha), the share of culture in crop-rotation 0,2%; potatoes (400 c/ha), 0,3%, perennial grasses (400 c/ha) 0,5%; water regulation methods of totality $\{s\}$, $s = \overline{1, n_s}$, ($s = 1$ – drainage).

On the basis of predictive-simulation modeling, the variable character of the values of drainage modules formed during the period of operation of the drainage system by crops, soils and years in the Western Polesia region of Ukraine was determined (Fig. 2).

By the complex of forecast-simulation models (21–23) the dynamics and values of the drainage flow average modules given in Fig. 2 were determined they show that under different weather and climatic conditions, growing different agricultural crops on different soils a significant change of their values in time period and space is observed.

Determined by the complex of forecasting-simulation models (Rokochinsky, Stashuk, 2011), the dynamics and values of the average drainage modules, which are presented in Fig. 2, show that for different weather and climatic conditions, when growing different crops on different soils, there is a significant change in their values over time and space.

In the sowing period of the accounting years, the values of drainage modules for grain and perennial grasses for mineral soils are 0,40... 0,62 l/s·ha, and for peat soils – 0,74... 0,96 l/s·ha, respectively for potatoes 0,40... 0,62 l/s·ha and 0,4... 0,96 l/s·ha.

During the growing season, the dynamics and values of drainage modules are determined by the mode and intensity of rainfall by year, as well as the type of soil. Thus, for mineral soil the modules are 0,25... 0,02 l/s·ha; for peat soil – 0,30... 0,015 l/s·ha. Changes in the average values of drainage modules, which are formed during the period of operation of drainage systems in terms of changing climatic conditions and cultivated crops for sod-gleyed sandy soils and peat soils of the Polesiazone are presented in Table 1.

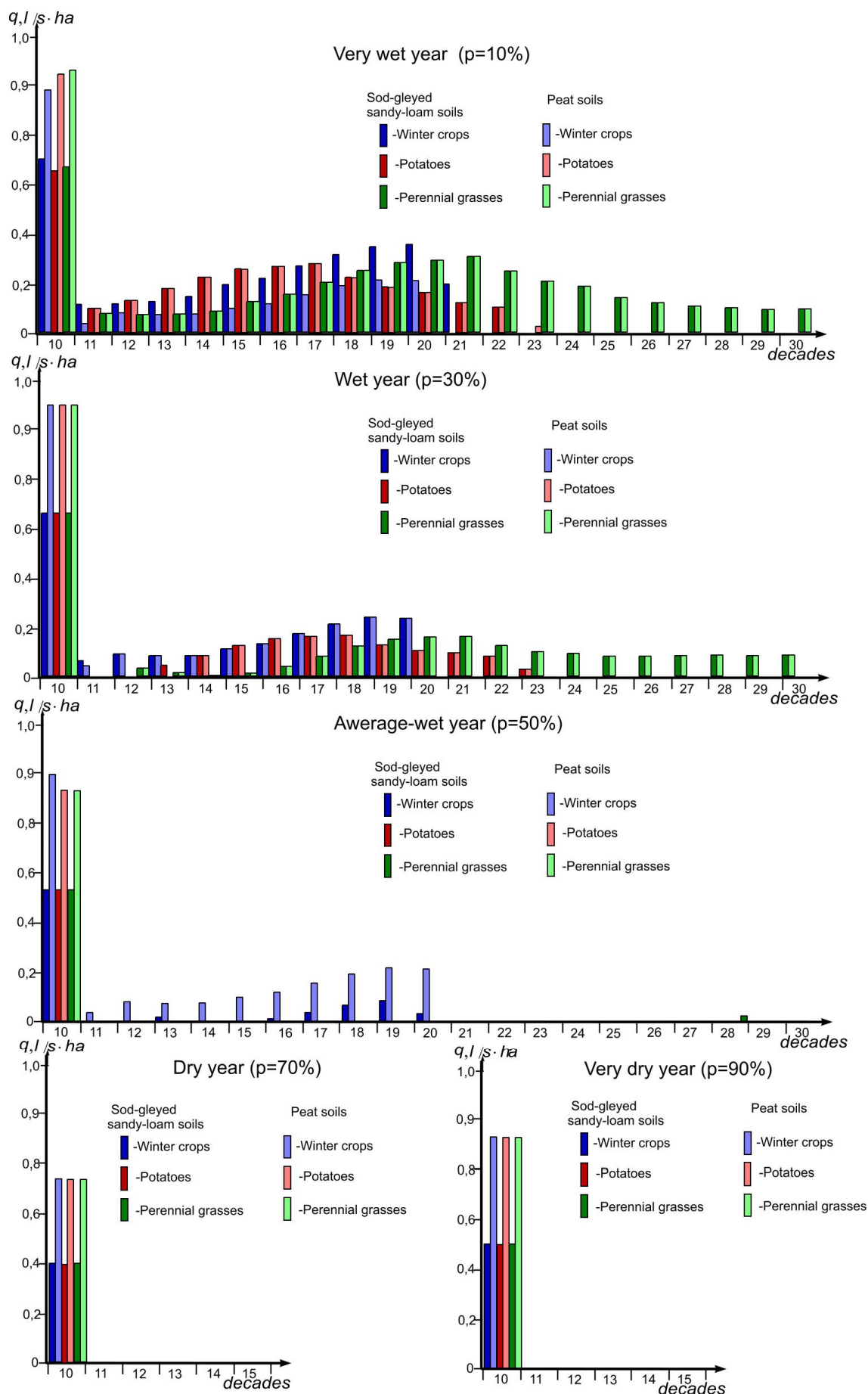


Fig 2. Values of average drainage modules that are formed during the period of operation of the drainage system for the main crops, for mineral and peat soils under changing climatic conditions of the Polissia region of Ukraine

Table 1

Generalized results on the variability of the average values of drainage modules, which are formed during the period of operation of drainage systems by variable weather-climatic, soil and agro-reclamation conditions of the Polesia region of Ukraine

Culture	Part of culture in crop-rotation	Calculated drainage modules, l/s·ha					Average values l/s·ha
		Calculated years with probability, p, %					
		10	30	50	70	90	
Mineral soils							
Winter crops	0,2	<u>0.62–0.17</u> 0,41	<u>0.52–0.18</u> 0,32	<u>0.46–0.02</u> 0,16	<u>0.45–0</u> 0,11	<u>0.40–0</u> 0,06	<u>0.41–0.03</u> 0,21
Potatoes	0,3	<u>0.57–0.09</u> 0,38	<u>0.52–0.02</u> 0,28	<u>0.46–0.02</u> 0,11	<u>0.45–0</u> 0,10	<u>0.40–0</u> 0,06	<u>0.41–0.01</u> 0,19
Perennial grasses	0,5	<u>0.59–0.08</u> 0,51	<u>0.53–0.06</u> 0,35	<u>0.47–0.02</u> 0,12	<u>0.44–0</u> 0,10	<u>0.41–0</u> 0,06	<u>0.42–0.01</u> 0,23
On the system as a whole	1,0	<u>0.59–0.10</u> 0,45	<u>0.52–0.06</u> 0,32	<u>0.47–0.02</u> 0,12	<u>0.44–0</u> 0,10	<u>0.41–0</u> 0,06	<u>0.48–0.03</u> 0,21
Peat soils							
Winter crops	0,2	<u>0.96–0.17</u> 0,46	<u>0.86–0.18</u> 0,39	<u>0.81–0.02</u> 0,25	<u>0.75–0</u> 0,18	<u>0.74–0</u> 0,11	<u>0.82–0.07</u> 0,28
Potatoes	0,3	<u>0.92–0.09</u> 0,43	<u>0.86–0.02</u> 0,35	<u>0.84–0</u> 0,20	<u>0.81–0</u> 0,18	<u>0.74–0</u> 0,12	<u>0.83–0.02</u> 0,26
Perennial grasses	0,5	<u>0.93–0.08</u> 0,56	<u>0.86–0.06</u> 0,42	<u>0.84–0</u> 0,20	<u>0.81–0</u> 0,18	<u>0.74–0</u> 0,12	<u>0.84–0.03</u> 0,30
On the system as a whole	1,0	<u>0.94–0.10</u> 0,50	<u>0.86–0.07</u> 0,39	<u>0.83–0.05</u> 0,21	<u>0.80–0</u> 0,19	<u>0.74–0</u> 0,12	<u>0.83–0.03</u> 0,28

Note: 0,62–0,17 – maximum and minimum values of drainage modules;
0,41 – average values of drainage modules.

The obtained results clearly show that the averaged values of the drainage module under the studied conditions, as in the previous case, have a pronounced variable character as for the changing climatic conditions during the billing years, the type of crops grown and the type of soil. At the same time, its value, both as for the selected main factors and DS in whole differs significantly, first of all, from the maximum current values and values during the growing season more than several times, which determines the need to take this into account when designing projects of reconstruction, construction and operation of this kind of objects.

Absolute values of the drainage modules under the conditions of their formation in the dynamics and averaged form as for the climatic, agro-technical and soil conditions of the Polisia zone do not reflect the duration and corresponding levels of drainage efficiency and DS as a whole in specified

zone. Therefore, to characterize the different levels of DS operation efficiency the values of drainage module totality are divided by us into $\{q_r\}$, $r = \overline{1, n_r}$ ($r = 1$ – environmental, $r = 2$ – technological, $r = 3$ – economic) in the spring billing period and drainage of the territory (low, medium, high) with the corresponding levels of productivity (profitability and values) of cultivated crops $U_k^r = f(Y_k^r)$, ($U_k^{(1)}$ – low, $U_k^{(2)}$ – medium, $U_k^{(3)}$ – high) and the values of the maximum deviation of the sum of average daily air temperatures accumulated from the date of the optimal sowing period or the renovation of vegetation $\sum \hat{T}_{kr}^a$ in the area of their biological optimum (Fig. 3).

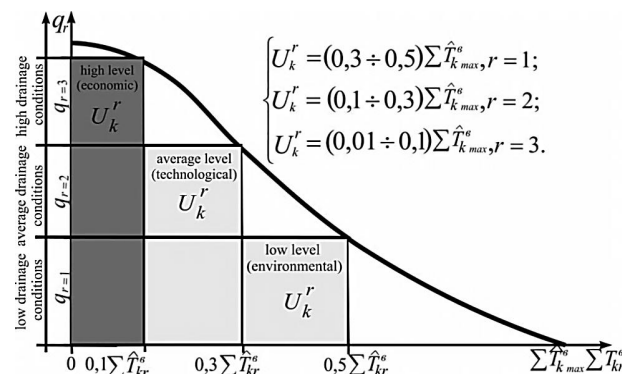


Fig. 3. The general dependence scheme q_r , $r = \overline{1, n_r}$ of $\sum \hat{T}_{kr}^a$ for k – this culture considering environmental, technological and economic efficiency levels of DS and drainage ability

$$q_k^r = f_2'(U_k^r, \sum \hat{T}_{kr}^a). \quad (24)$$

In this form, function (24) reflects the relationship between the different levels of DS operation efficiency totality $\{q_r\}$, $r = \overline{1, n_r}$ ($r = 1$ – environmental, $r = 2$ – technological, $r = 3$ – economic) in the spring billing period, the drainage ability of the territory (low, medium, high) and the levels

of productivity (profitability and values) of cultivated crops $U_k^r = f(Y_k^r)$, ($U_k^{(1)}$ – low, $U_k^{(2)}$ – medium, $U_k^{(3)}$ – high) with the corresponding values of the maximum deviation of the sum of average daily air temperatures accumulated from the date of the optimal sowing date or the renovation of vegetation in zone of their biological optimum $\sum \hat{T}_{kr}^a$.

Based on the above given models and diagrams with defining and changing drainage modules totality $\{q_{kgr\tau}\}$

for each crop $k = \overline{1, n_k}$, soil $g = \overline{1, n_g}$, calculated under conditions of heat and humidity of vegetation periods $p = \overline{1, n_p}$, calculated time intervals (decade) $\tau = \overline{1, n_\tau}$, indicators of drainage and DS operation duration in general for existing variable conditions, which describe various aspects of their work under the influence of multiple variables natural farming and reclamation conditions of a real object can be determined (Rokochynskyy, Volk, 2013, 2019).

The indicator of total duration of drainage and DS operation as a whole during the billing growing season is defined as

$$\theta_p^q = \frac{t_{p\tau}^q}{t_{p\tau}} \quad p = \overline{1, n_p}, \quad \tau = \overline{1, n_\tau}. \quad (25)$$

Similarly, an indicator of the duration of drainage and DS operation at the appropriate level of their efficiency during the billing growing season

$$\theta_{rkgr\tau}^q = \frac{t_{rkgr\tau}^q}{t_{kgr\tau}}, \quad r = \overline{1, n_r}, \quad k = \overline{1, n_k}, \quad g = \overline{1, n_g}, \quad p = \overline{1, n_p}, \quad \tau = \overline{1, n_\tau}, \quad (26)$$

where $t_{rkgr\tau}^q$ – the duration of drainage and DS operation on different levels of efficiency $\{r\}$, $r = \overline{1, n_r}$ for the changing conditions of the object studied as $k = \overline{1, n_k}$, $g = \overline{1, n_g}$,

$p = \overline{1, n_p}$, $\tau = \overline{1, n_\tau}$, days; $t_{kgr\tau}$ – the duration of the billing growing season of the cultivated crop, days.

Then, taking into account (25) and (26), the drainage and DS operation duration indicator for each level of their efficiency considering to the culture, soil and system as a whole within the project lifetime of the facility in general can be defined as

$$\theta_{sv}^q = \sum_{g=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_k} \left(\sum_{p=1}^{n_p} \theta_{rkgr\tau}^q \cdot \alpha_p \right) \cdot f_k \cdot f_g. \quad (27)$$

Performed evaluation of drainage efficiency and DS operation in the investigated conditions according to the corresponding "duration indicators" is presented in the form of appropriate diagrams (Fig. 4).

Obtained evaluation efficiency of the DS operation for typical conditions and averaged data of climate change Polisia area on different levels of performance show that on average ten-day conditions formation of precipitation and corresponding values of drainage modules $q_{kgr\tau}$, while growing perennial grasses, winter cereals and potatoes, duration the growing season is 214 days (100 %), of which the lifetime of the DS – 60%, including those with different levels of efficiency: Environmentally friendly – 39 %, technological – 15,5 %, economical – 5,5 %. In critical conditions $q'_{kgr\tau}$, for the same duration of growing season (100%), the lifetime of the drainage and DS is 68 %, considering different levels of its efficiency, environmental – 24% for production – 6,5 %, economic – 9,5 %, allowable critical – 15,5 % and in critical mode – does not exceed 5 %, which is quite clear.

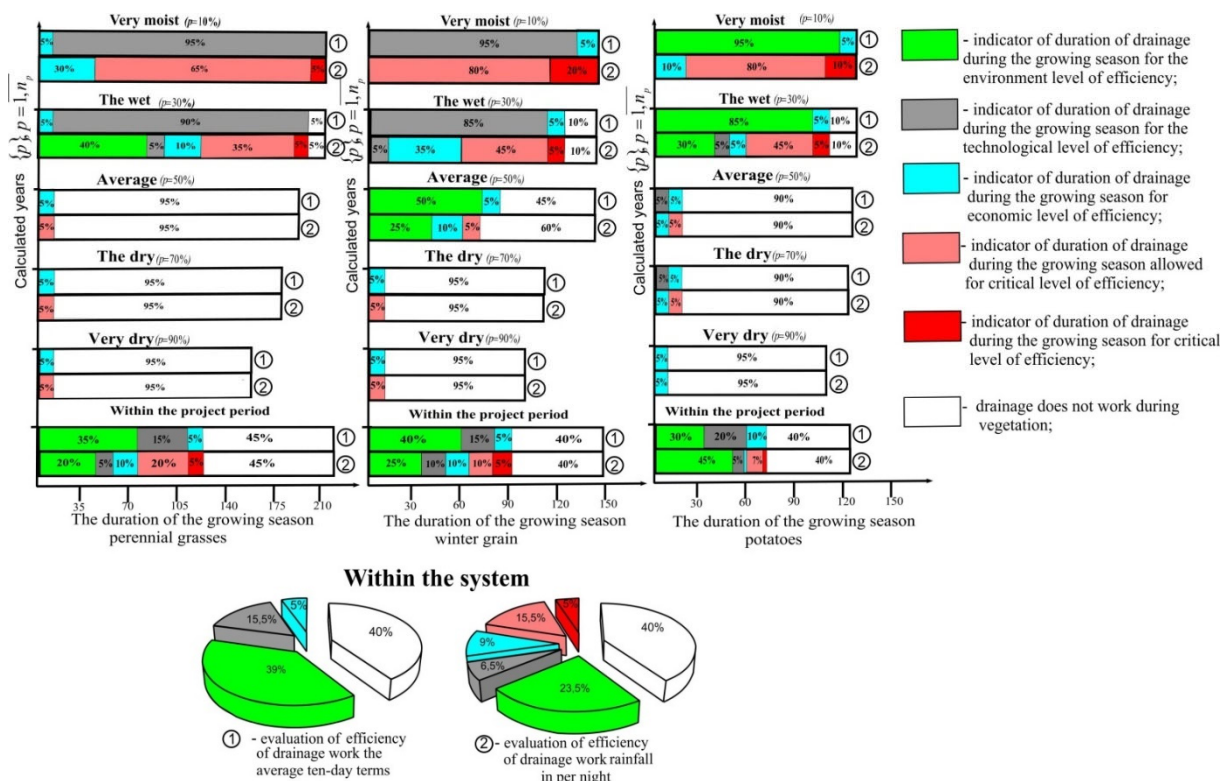


Fig. 4. Evaluation efficiency of drainage and DS operation by certain calculated data of drainage module

With climate changing, more often situations arise when the DS operates in critical conditions, a change in the nature and intensity of rainfall (ten-day precipitation falls instantly – per day) occur. Then a dramatic rise in the GWT can occur and a drainage module may be formed that exceeds its calculated value. In this case, projected drainage may not cope with the removal of excess moisture from the soil, a permissible

or critical soil moisture occurs, which leads to crop losses. In this case, the waste of the yield from short time raise of GWT to the depth of 0,5 m for 2–3 days up 10...20 %, to a depth of 0,6 m – 8...14 % and 0,7 m – 5...10 %.

Evaluation of DS effectiveness in critical conditions is performed by a method similar to the one stated previously. At the same time, instead of the values of the average ten-

day drainage modules determined by the conditions of formation of the corresponding sums over the decade, the average daily values should be considered when the ten-day precipitation falls in one day. Here, indicators of the duration of the permissible and critical periods of drainage and DS operation in general, when the projected drainage cannot cope with the work and the permissible or critical soil mois-

ture for cultivated crops, are determined similarly to the considered indicators of the duration of their work. The generalized results of the estimation of the efficiency of the DS operation in the conditions investigated in the fallout of daily maximums of precipitation of different provision, which form the critical conditions of drainage and DS operation, are given in Table 2.

Table 2

Efficiency of drainage of the investigated object in critical conditions at the fall of daily maximums precipitation with different reserves

Region	Value of indicators	Estimated reserves p , %						Averaged values of critical periods of wetting of cultivated crops, days
		5 %	10 %	30 %	50 %	70 %	90 %	
Rivne	P_r , mm	89	73	49	42	31	21	6–4
	P'_r , mm	47	33	12	6	0	0	
	q_0 l/s ha	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
	t (days)	8,4	5,8	2,2	1,1	0	0	

Obtained results show that when using the operating DS in critical conditions acceptable moisture supply to grow crops in most cases is provided – when the stock of daily maximum precipitation does not exceed 30 %.

Conclusion

Based on the research results, the analysis of hydrological action of the drainage and the drainage system in the Polesia area was performed. This analysis showed that for different climatic conditions and different crops on different soils there is a change in their values in time. At the same time, its value for different climatic, agrotechnical and climatic conditions and in the drainage system differs from the maximum values and values during the growing season more than a few times. The values of drainage modules in the spring for grain and grass on mineral soils are 0,38...0,68 l/s·ha, and on peat soils are 0,65...0,94 l/s·ha; for potatoes on mineral soils are 0,40...0,62 l/s·ha and on peat soils are 0,38...0,96 l/s·ha. During the growing season, the dynamics and values of drainage modules for mineral soil, they are 0,25...0,020 l/s·ha; for peat soil is 0,30...0,015 l/s·ha.

Evaluation of the efficiency of drainage systems for different levels of productivity showed that water supply conditions and the length of the growing season are good for perennial grasses, winter crops, and potatoes under the average decade conditions of precipitation and values of drainage modules. The value of drainage modules in the cultivation of perennial grasses, winter crops, and potatoes, the duration of the growing season is 214 days (100 %), of which the total service life of the drainage system is 60 %, including different levels of the system efficiency: environmental level – 39 %, technological level – 15,5 %, economic level – 5,5 %. In critical conditions, the total service life of drainage and drainage systems is 68 %. This includes different levels of its efficiency: environmental level – 24 %, technological level – 6,5 %, economic level – 9,5 %, acceptable critical level – 15,5 %, and at the critical level is less than 5 %.

Список використаних джерел

- Антонов, А.Д. (1974). Исследование посевного срока северо-запада Украины. Автореф. дисс... канд. техн. наук. Ровно.
- Волк, П.П., Рокочинський, А.М. (2011). Обґрунтування модуля дренажного стоку в оптимізаційних розрахунках сільськогосподарського дренажу на еколого-економічних засадах. Вісник національного університету водного господарства та природокористування, 2 (54), 3–10.
- Гадзало, Я.М., Сташук, В.А., Рокочинський, А.М. (ред.) (2017). Меліорація та облаштування Українського Полісся. Т. 1. Київ; Рівне; Херсон: Олді плюс.
- Гейтман, В.Г., Писарьков, К.А. (1955). Осушение сельскохозяйственных земель. Москва.
- ДБН В.2.4-1-99. (1999). Меліоративні системи та споруди. Київ.
- Ивицкий, А.И. (1981). Установление расстояний между дренами. Дополнение № 1 к руководству по проектированию осушительных систем сельскохозяйственного назначения. Минск.
- Кожушко, Л.Ф. (2001). Удосконалення дренажних систем. Рівне.

- Костяков, А.Н. (1960). Основы мелиораций. Москва.
- Лазарчук, М.О., Рокочинський, А.М., Муранов, В.Г. (2000). Оптимізація параметрів основних елементів осушувальних систем за економіко-математичним методом. 36. наук. праць: Вісник Рівненського державного технічного університету, 4 (6), 66–72.
- Лихачевич, А.П. (2001). Мелиорация земель Белоруси. Минск.
- Лукашас, А.Д. (1975). Опыт осушения земель закрытым дренажем. Москва.
- Олейник, А.Я., Поляков, В.Л. (1987). Дренаж переувлажненных земель. Київ.
- Рокочинський, А.М. (2010). Наукові та практичні аспекти оптимізації водорегулювання осушуваних земель на еколого-економічних засадах. За ред. Ромащенко М.І. Рівне.
- Рокочинський, А.М., Волк П.П. та ін. (2013). Науково-методичні рекомендації до обґрунтування оптимальних параметрів сільськогосподарського дренажу на осушуваних землях за економічними та екологічними вимогами. Рівне.
- Рокочинський, А.М., Галік, О.І., Сташук, В.А., Фроленкова, Н.А., Волощук, В.А. та ін. (2008). Посібник до ДБН В.2.4-1-99 "Меліоративні системи та споруди" (Розд. 3. Осушувальні системи). Метеорологічне забезпечення інженерно-меліоративних розрахунків у проектах будівництва й реконструкції осушувальних систем. Рівне.
- Рокочинський, А.М., Сташук, В.А., Дупляк, В.Д., Фроленкова, Н.А. та ін. (2011). Тимчасові рекомендації з прогнозу оцінки водного режиму та технологій водорегулювання осушуваних земель у проектах будівництва й реконструкції меліоративних систем. Рівне.
- Тумас, Р.А. (1975). Водно-балансовые расчеты дренажа на суглинистых грунтах в Литовской ССР. Автореф. дисс. ... д-р. с-г. наук. Каунас.
- Шевченко, А.Л., Осадчий, В.И., Нестеровский, В.А. (2019). Режим, водообмен и ресурсы подземных вод Полесья и Лесостепи в контексте глобальных изменений климата. Сборник мат-лов IV Межд. науч.-пр. конф. "Актуальные проблемы наук о Земле. Исследования трансграничных регионов", 12–14 сент. 2019, Брест, 1, 33–37.
- Шкиннис, Ц.Н. (1981). Гидрологическое действие дренажа. Ленинград.
- Шрейдер, В.А. (1970). Осушение земель закрытым дренажем. Москва.
- Энгельсманн, Р. (1978). Руководство по дренажу. Москва.
- Янголь, А.М. (1970). Двустороннее регулирование влажности при осушении. Москва.
- Kudakas, V., Pocienė, A., Urbonas, R. (1998). Klimatinų veiksmų įtaka dirvožemio drėgmei ir drenažo nuotėkiui [The effect of climatic factors on soil moisture and drainage flow]. Žemės ūkio mokslo, 2, 61–65.
- Lukianas, A., Ruminaitė, R. (2009). Periodiška žemės sausimo drenažo įtaka upių nuotėkiui. Journal of environmental engineering and landscape management, 17(4), 226–235.
- Miseckaitė, O., Girklys, V. (2011). The trends of drainage runoff change in loam soils during a multi-year period. Environmental engineering, 8th International Conference, May 19–20. Vilnius, Lithuania, 625–629.
- Morkūnas, V.; Ramoška, E. (2001). Drenažo nuotėkio reguliavimo tyrimai [Drainage run-off regulatory investigations]. Vandens ūkio inžinerija, 16 (38), 53–59.
- Rokochinskiy A., Volk P. et al. (2019a). Forecaste destination of the efficiency of agricultural drainage on drained lands. Journal of Water and Land Development, 40, Issue 1, 149–153. DOI:https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0016.
- Rokochinskiy A., Volk P. et al. (2019, b). Evaluation of climat echanges and their accounting for developing the reclamation measures in Western Ukraine. Scientific Review Engineering and Environmental Sciences, 28, 1 (83), 3–13. DOI:10.22630/PNIKS. 2019.28.1.1.
- Schultz, B., De Wrachien, D. (2002). Irrigation and Drainage systems research and development in the 21st century. Irrigation and drainage, 51, 311–327.
- Šleika, A.S., Gužys, S. (2003). Drainage runoff and migration of mineral elements in organic and conventional cropping systems. Agronomic, 23, 633–641.
- Wesstrom, I., Messing, I., Linner, H., Lindstrom, J. (2001). Controlled drainage – effects on drain outflow and water quality. Agricultural Water Management, 47, 85–100.

Žemės, L. (1995). Hidrometrinis metraštis. Drenažo ir paviršiaus nuotėkis [Hydrometer year book. Drain age and surface runoff]. Kaunas-Noreikiškės.

References

- Antonov, A.D. (1974). Research of a sowing line of the northwest of Ukraine. *Extended abstract of Candidate's thesis (Tech. Sci.)*. Rivne. [in Russian]
- DBN V.2.4-1-99. (1999). Reclamation systems and structures. Kyiv. [in Ukrainian]
- Engelsmann, R. (1978). Drainage guide. Moscow. [in Russian]
- Geytman, V.G., Pisarkov, K.A. (1955). Drainage of agricultural land. Moscow: Selhoizdat. [in Russian]
- Hadzalo, Ya.M., Stashuk, V.A., Rokochinskiy, A.M. (Eds.). (2017). Reclamation and arrangement of Ukrainian Polissya. B. 1. Kherson: Oldi plus. [in Ukrainian]
- Ivitskiy, A.I. (1981). Establishing Drain Distance. Supplement No.1 to the Design Guide for Agricultural Drainage Systems. Minsk: Uradzhyay. [in Russian]
- Kostyakov, A.N. (1960). Fundamentalsof landreclamation. Moscow: Gos. ed. agricultural. literature. [in Russian]
- Kozhushko, L.F. (2001). Improvement of drainage systems. Rivne. [in Ukrainian]
- Kudakas, V., Pocienė, A., Urbonas, R. (1998). Klimatinių veiksnių įtaka dirvožemio drėgmei ir drenažo nuotėkiui [The effect of climatic factors on soil moisture and drainage flow]. *Žemės ūkio mokslai*, 2, 61–65.
- Lazarchuk, M.O., Rokochinskiy, A.M., Muranov, V.G. (2000). Optimization of parameters of the main elements of drainage systems by economic and mathematical method. *Bulletin of Rivne State Technical University*, 4(6), 66–72. [in Ukrainian]
- Lihatsevich, A.P. (2001). Land reclamation of the lands of Belarus. Minsk: BelNIIMIL. [in Russian]
- Lukianas, A., Ruminaitė, R. (2009). Periodiškai šlapių žemių sausavimo drenažo įtaka upių nuotėkiui. *Journal of environmental engineering and landscape management*, 17(4), 226–235.
- Lukianas, A.D. (1975). The experience of land drainage by closed drainage. Moscow. [in Russian]
- Miseckaitė, O., Gurklys, V. (2011). The trends of drainage runoff change in loam soils during a multi-year period. *Environmental engineering, 8th International Conference*, May 19–20. Vilnius, Lithuania, 625–629.
- Morkūnas, V.; Ramoška, E. (2001). Drenažo nuotėkio reguliavimo tyrimai [Drainage run-off regulatory investigations]. *Vandens ūkio inžinerija*, 16 (38), 53–59.
- Oleynik, A.Ya., Polyakov, V.L. (1987). Waterlogged land drainage. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Rokochinskiy A., Volk P. et al. (2019, a). Forecaste destimation of the efficiency of agricultural drainage on drained lands. *Journal of Water and Land Development*, 40, Issue 1, 149–153. DOI:https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0016.

Rokochinskiy A., Volk P. et al. (2019, b). Evaluation of climat exchanges and their accounting for developing the reclamation measures in Western Ukraine. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 28, Issue 1 (83), 3–13. DOI:10.22630/PNIKS.2019.28.1.1.

Rokochinskiy, A.M. (2010). Scientific and practical aspects of optimization of water regulation of drained lands on ecological and economic principles. Rivne. [in Ukrainian]

Rokochinskiy, A.M., Halik, O.I., Stashuk, V.A., et al. (2008). Manual to DBN B.2.4-1-99 "Reclamation systems and structures" (Section 3. Drainage systems). Meteorological support of engineering and reclamation calculations in projects of construction and reconstruction of drainage systems. Rivne. [in Ukrainian]

Rokochinskiy, A.M., Stashuk, V.A., Dupliak, V.D., Frolenkova, N.A. et al. (2011). Interim recommendations on the forecast assessment of the water regime and technologies of water regulation of drained lands in projects of construction and reconstruction of reclamation systems. Rivne. [in Ukrainian]

Rokochinskiy, A.M., Volk, P.P. et al. (2013). Scientific and methodical recommendations for substantiation of optimal parameters of agricultural drainage on drained lands according to economic and ecological requirements. Rivne. [in Ukrainian]

Schultz, B., De Wrachien, D. (2002). Irrigation and Drainage systems research and development in the 21st century. *Irrigation and drainage*, 51, 311–327.

Shevchenko, A.L., Osadchii, V.I., Nesterovsky, V.A. (2019). Regime, water exchange and groundwater resources of Polesia and Forest-Steppe in the context of global climate change. *Mater. IV International scientific-practical conf. "Actual problems of Earth sciences. Studies of cross-border regions"*, September 12–14, 2019, Brest, 1, 33–37.

Shkinkis, Ts.N. (1981). Hydrological drainage action. Leningrad : Gidrometeoizdat. [in Russian]

Shreyder, V.A. (1970). Land drainage by closed drainage. Moscow. [in Russian]

Šileika, A.S.; Gužys, S. (2003). Drainage runoff and migration of mineral elements in organic and conventional cropping systems. *Agronomic*, 23, 633–641.

Tumas, R.A. (1975). Water-balance calculations of drainage on loamy soils of the Lithuanian SSR. *Extended abstract of Doctor's thesis (Agri. Sci.)* Kaunas. [in Russian]

Volk, P.P., Rokochinskiy, A.M. et al. (2011). Substantiation of the drainage runoff module in optimization calculations of agricultural drainage on ecological and economic bases. *NUWEE Bulletin*, 2(54), 3–10. [in Ukrainian]

Wesstrom, I., Messing, I., Linner, H., Lindstrom, J. (2001). Controlled drainage – effects on drain outflow and water quality. *Agricultural Water Management*, 47, 85–100.

Yanhol, A.M. (1970). Two-way humidity control for drainage. Moscow. [in Russian]

Žemės, L. (1995). Hidrometrinis metraštis. Drenažo ir paviršiaus nuotėkis [Hydrometer year book. Drain age and surface runoff]. Kaunas-Noreikiškės.

Надійшла до редколегії 15.07.2020

A. Рокочинський, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua,
Національний університет водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000, Україна;
О. Шевченко, д-р геол. наук, проф., ст. наук. співроб.,
E-mail: shevch62@gmail.com,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
П. Волк, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: p.p.volk@nuwm.edu.ua;
В. Турченко, д-р техн. наук, доц., проф.,
E-mail: fwg@ukr.net;
Р. Коптюк, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: r.m.koptiuk@nuwm.edu.ua;
Л. Волк, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: l.r.volk@ukr.net;
Національний університет водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000, Україна

ГІДРОГЕОЛОГІЧНА ДІЯ ДРЕНАЖУ ТА ДРЕНАЖНИХ СИСТЕМ ЗОНИ ПОЛІССЯ У ЗМІННИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ

Проведено аналіз літературних джерел щодо різних методів і моделей з визначення та розрахунку модуля дренажного стоку як визначального показника гідрогеологічної дії дренажу і дренажності території. Для обчислення розрахункового модуля дренажного стоку застосовують емпіричний, аналітичний, водно-балансовий методи або приймають його за рекомендаціями без достатнього економічного та екологічного обґрунтування, що не відповідає сучасним вимогам при створенні та функціонуванні такого роду об'єктів. Традиційно конструкції та параметри сільськогосподарського дренажу визначаються за розрахунковим модулем дренажного стоку, який забезпечує необхідні умови відведення зайвої вологи активного шару ґрунту у весняний період (як основний розрахунковий) і відповідає певному рівню розрахункової забезпеченості формування гідрографа стоку. За узагальненими результатами досліджень при розрахунку параметрів дренажу значення модулів дренажного стоку брались у межах: для мінеральних ґрунтів 0,4...0,6 л/с-га, для торф'яних – 0,2...0,6 л/с-га. Ці рекомендовані значення не виправдали себе, оскільки визначені за ними параметри дренажу враховують тільки технологічні умови його роботи. Але при цьому недостатньо враховані умови формування економічного і абсолютно екологічного ефекту в межах системи, що не дозволяє вважати ці модулі оптимальними. Виконані нами дослідження й оцінка гідрогеологічної дії дренажу та дренажних систем показали значну мінливість значень модулів дренажного стоку в часі й просторі, виявили значну кількість чинників, що на них впливають, підтвердили їхню невідповідність прийнятим розрахунковим значенням. У зв'язку із цим запропоновано новий підхід до оцінки ефективності дії дренажних систем і визначення модулів дренажного стоку – за критерієм формування врожайності за змінних природних (у т.ч. кліматичних) і агротехнічних умов. Наведено нові оптимальні розрахункові значення модулів дренажного стоку, у т.ч. для критичних умов – при випадінні добових максимумів опадів різної забезпеченості.

Ключові слова: модулі стоку, ґрунтові води, гідрогеологічна дія дренажу, дренажні системи, змінні кліматичні умови, ґрунти.

А. Рокочинский, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua,
Национальный университет водного хозяйства и природопользования,
ул. Соборная, 11, г. Ровно, 33000, Украина;
А. Шевченко, д-р геол. наук, проф., ст. науч. сотр.,
E-mail: shevch62@gmail.com,
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,
ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
П. Волк, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: p.p.volk@nuwm.edu.ua;
В. Турченко, д-р техн. наук, доц., проф.,
E-mail: fwg@ukr.net;
Р. Коптюк, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: r.m.koptyuk@nuwm.edu.ua;
Л. Волк, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: l.r.volk@ukr.net;
Национальный университет водного хозяйства и природопользования,
ул. Соборная, 11, г. Ровно, 33000, Украина

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ДРЕНАЖА И ДРЕНАЖНЫХ СИСТЕМ ЗОНЫ ПОЛЕСЬЯ В ИЗМЕНЧИВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Проведен анализ литературных источников по различным методам и моделям определения и расчета модуля дренажного стока как определяющего показателя гидрогеологического действия дренажа и дренированности почвы и территории. Определено, что для вычисления расчетного модуля дренажного стока применяют эмпирический, аналитический, водно-балансовый метод или принимают его по рекомендациям без достаточного экономического и экологического обоснования, что не соответствует современным требованиям при создании и функционировании такого рода объектов. Традиционно конструкции и параметры сельскохозяйственного дренажа определяются по расчетным модулям дренажного стока, который обеспечивает необходимые условия отвода лишней влаги активного слоя почвы в весенний период (как основной расчетный) и соответствует определенному уровню расчетной обеспеченности формирования гидрографа стока. По обобщенным результатам исследований при расчете параметров дренажа значения модулей дренажного стока принимались в пределах: для минеральных почв 0,4...0,6 л/с·га, на торфяных почвах 0,2...0,6 л/с·га. Эти рекомендуемые значения как расчетные не оправдали себя, поскольку определенные по ним параметры дренажа учитывают только технологические условия его работы. Но при этом недостаточно учтены условия формирования экономического и абсолютно экологического эффекта в рамках системы, то есть они не являются экономически и экологически оптимальными. Выполненные нами исследования и оценка функциональной эффективности дренажа и дренажных систем показали значительную изменчивость значений модулей дренажного стока во времени и пространстве, обнаружили значительное количество факторов на них влияющих, подтвердили их несоответствие принятым расчетным значениям. В связи с этим предложен новый подход к оценке эффективности действия дренажных систем и определения модулей дренажного стока – по критерию формирования урожайности в переменных природных (в т.ч. климатических) и агротехнических условиях. Приведены новые оптимальные расчетные значения модулей дренажного стока, в т.ч. для критических условий – при выпадении суточных максимумов осадков различной обеспеченности.

Ключевые слова: модули стока, грунтовые воды, гидрогеологическое действие дренажа, дренажные системы, переменные климатические условия, почвы.

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 550.3(519.21)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.12>

Z. Vyzhva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,

E-mail: zoya_vyzhva@ukr.net;

V. Demidov, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,

E-mail: fondad@ukr.net;

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

A. Vyzhva, PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher,

E-mail: motomustanger@ukr.net;

SE "Naykanafto-gaz", Kyiv, Ukraine

**THE STATISTICAL SIMULATION OF DATASET IN 3D AREA
WITH SPHERICAL CORRELATION FUNCTION ON RIVNE NPP EXAMPLE***(Представлено членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Б.П. Маслоу)*

Due to the increasing number of natural and technogenic disasters, the development of geological environment monitoring system is actual in using modern mathematical tools and information technology. The local monitoring of potentially dangerous objects is an important part of the overall environment monitoring system.

The complex geophysical research was conducted on Rivne NPP area. The monitoring observations radioisotope study of soil density and humidity near the perimeter of buildings is of the greatest interest among these.

In this case a problem occurred to supplement simulated data that were received at the control of chalky strata density changes at the research industrial area with use of radioisotope methods on a grid that included 29 wells.

This problem was solved in this work by statistical simulation method that provides the ability to display values (the random field of a research object in 3D area) in any point of the monitoring area. The chalk strata averaged density at the industrial area was simulated using the built model and the involvement optimal in the mean square sense spherical correlation function.

In this paper, the method is used and the model and procedure were developed with enough adequate data for spherical correlation function.

The model and algorithm were developed and examples of karst-suffusion phenomena statistical simulation were given in the problem of density chalk strata monitoring at the Rivne NPP area. The statistical model of averaged density chalk strata distribution was built in 3D area and statistical simulation algorithm was developed using spherical correlation function based on spectral decomposition. The research subject realizations were obtained with required detail and regularity at the observation grid based on the developed software. Statistical analysis of the numerical simulation results was done and tested for its adequacy.

Keywords: Statistical simulation, spherical correlation function, spectral decomposition, conditional maps.

Introduction. Due to the increasing frequentative number of dangerous natural and technogenic disasters, the development of geological environment monitoring system is actual using modern mathematical tools and information technology. The regular local monitoring of potentially dangerous objects is an important part of the overall environment monitoring system. When the monitoring of such objects many actual problems were raised, for example, such as the lack of some data in the database, or insufficient quantity or necessity to supplement the database without conducting additional research.

Theoretical aspects of capacity use of the statistical simulation to solving different problems in the work of Geophysics considered in (Yadrenko, 1983; Vyzhva, 2003, 2011). Practical testing on real density chalky strata data on the Rivne NPP territory was carried out for the 3D area – in the following works (Vyzhva et al., 2013, 2014, b), by using Bessel correlation function and Cauchy correlation function.

In this paper, the statistical simulation method for random field in 3D area is proposed to use with the model and procedure involving enough adequate in the mean square sense data spherical correlation function (Chiles et al., 2012). This problem was considered also in paper (Vyzhva et al., 2019).

Note, that methods of 3D random fields statistical simulation used in geosciences problems was developed by the scientists: Mantoglov A., Wilson John L. (1981), Chiles J.P., Delfiner P. (2012), Wackernagel H. (2003), Prigarin S.M. (2005), Emery X. (2006) and other.

The problem of karst-suffusion phenomena monitoring at Rivne NPP 3D area.

The complex geophysical research was conducted on Rivne NPP 3D area during many years. The radioisotope

study of soil density and humidity near the perimeter of constructed buildings is of the greatest interest among these monitoring observations. The soil density was determined by gamma-gamma well logging, soil humidity was determined also by neutron-neutron logging.

In this case (Vyzhva et al., 2013) a problem occurred to supplement adequately simulated data that were received at the control of chalky strata density changes at the research industrial area with use of radioisotope methods on a grid that included 29 wells. Schematic representation of the measurement results at the Rivne NPP object that was investigated, and the well locations are shown on Fig. 1. These data are obviously not enough in detail to represent the overall picture of the chalk strata, where due to the aggressive water action the karst-suffusion processes were significantly intensified.

This noted problem was solved in following works: (Vyzhva et al., 2013, 2014, a, 2014, b, 2019) by statistical simulation method that provides the ability to display values (random field in 3D space) in any point of the monitoring area. The chalk strata averaged density at the industrial area was simulated using the built 3D model and the involvement of the Bessel type correlation function (Vyzhva et al., 2013) and Cauchy correlation function (Vyzhva et al., 2014, b).

This paper continues further development of 3D statistical simulation methods, involving optimal in the mean square sense spherical correlation function that is well-known in geostatistics works (Chiles et al., 2012). This operation was done for data array of density chalk strata in 1984–2002s for 29 wells at Rivne NPP industrial area and depths are 28 m, 29 m and 30 m below the surface.

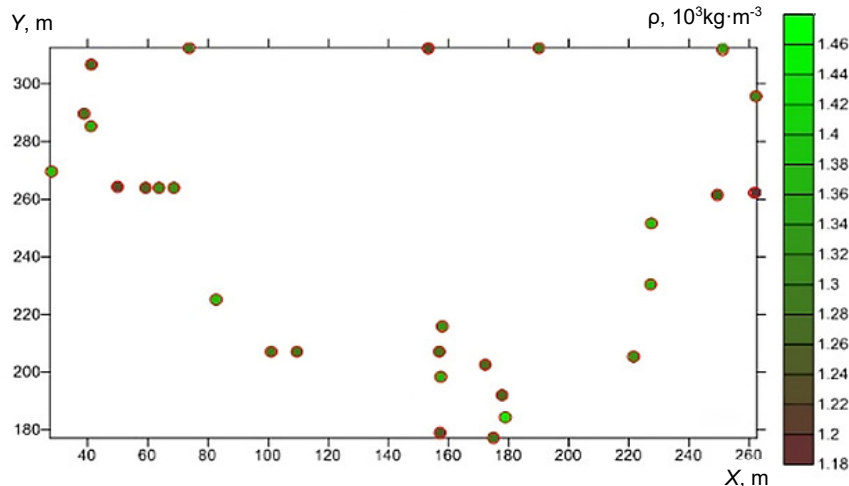


Fig. 1. Observation points and chalk strata averaged density at industrial area of Rivne NPP

The method of solving the problem. The statistical simulation of density chalky strata data was performed at three levels (28, 29, 30 m from the surface) in this paper. While constructing graphs of density chalky strata data at the Rivne NPP object for each specified account, we noticed that it is expedient to distinguish deterministic and random components. Deterministic component can be selected as function by the method of approaching the minimum curve (separation of the so-called trend). The difference between the map of input density values and the trend is a realization of homogeneous isotropic random field in the most cases.

Input data on the each of three level from the surface is a realization of random field in 3D space $\eta(x, y, z_i), i = 1, 2, 3; z_1 = 28m, z_2 = 29m, z_3 = 30m$. $\eta(x, y, z_i) = \eta_i(r, \theta, \varphi)$ (r, θ, φ) – spherical coordinates, i – level numbers. The trend $f_i(r, \theta, \varphi)$ and the stationary random component $\xi_i(r, \theta, \varphi)$ (frequently homogeneous isotropic random field in 3D space, so-called "noise") were selected for each level:

$$\eta_i(r, \theta, \varphi) = f_i(r, \theta, \varphi) + \xi_i(r, \theta, \varphi), i = 1, 2, 3.$$

The final modelling stage was the imposing array of random field realizations $\xi_i(r, \theta, \varphi), i = 1, 2, 3$, what we got by statistical simulation in add points from 3D observations area on the approximation of real data. As a result, we received more detailed implementation for the chalk layer density data in the selected 3D area at Rivne NPP.

We use the method of statistical simulation of homogenous isotropic random fields in 3D area for the solving arising problem, which is based on their spectral

decomposition (Vyzhva, 2003). By means of realizations of obtained values, this technique allows to find the perfect image of these random fields in the whole observation area at the Rivne NPP.

It is necessary to make the statistical analysis of data to build the model and procedure of chalky strata density simulation at observation 3D area. If the verified 3D data has distribution density with approximately Gaussian type, then procedure can be used, which is developed in (Vyzhva et al., 2013; Vyzhva, 2011), to generate on the computer realizations of the simulated data by means of standard normal random variable sequences.

At first the distribution of chalky strata density data at the Rivne NPP is determined. The preliminary statistical analysis of 3D data shows that the distribution histogram of chalky strata density at the Rivne industrial area (29 boreholes) approximately has Gaussian distribution (Fig. 2).

The use of authors' techniques of statistical simulation implies preliminary statistical data processing to determine its statistical characteristics: the mathematical expectation and the correlation function model. If the hypothesis of Gaussian distribution of the investigated data field is confirmed, then the mathematical expectation and the correlation function completely define this random field in 3D area and give us the opportunity to build the adequate statistical model for data field, which is based on the spectral decomposition. The principles of constructing the models and procedures for the spherical correlation function were considered in work (Vyzhva et al., 2019) and described below.

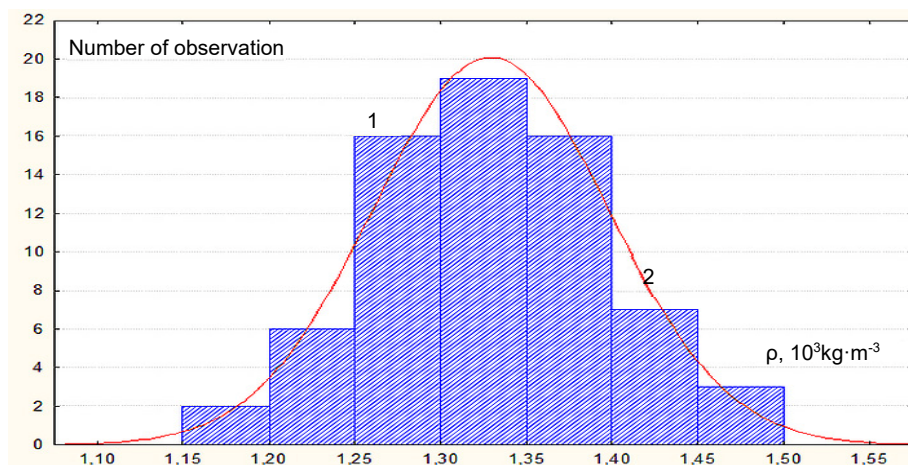


Fig. 2. The preliminary statistical analysis of 3D data at the Rivne industrial area

Then statistical models were chosen for the data correlation function $B(\rho)$ (ρ – the distance between vectors $x, y \in R^3$ ($x = (r_1, \theta_1, \varphi_1), y = (r_2, \theta_2, \varphi_2)$) for distribution of chalky strata density in the 3D observation area. This function is defined by comparing the mean square approximation of the empirical and theoretical variograms of chalky strata density data. As a result, the input data was most adequately described by means of 3 types of correlation functions: the Bessel correlation function (1) at the value of parameter $c = 5$; the Cauchy correlation function (2) at the value of parameter $a = 1$ and the spherical correlation function (3) at the value of parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$.

$$B(\rho) = \sqrt{\frac{\pi}{2cr}} J_{\frac{1}{2}}(c\rho), \quad c = 5, \quad (1)$$

where $J_k(x)$ is the Bessel function of the first kind of order $k = 1/2$,

$$B(\rho) = \frac{a^4}{(a^2 + \rho^2)^2}, \quad a = 1, \quad (2)$$

$$B(\rho) = \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} \frac{\rho}{a} + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{a} \right)^3, & \rho \leq a; \\ 0, & \rho > a. \end{cases} \quad (3)$$

The graphic representations of the spherical function at value of parameter $a = 2$ are presented in Fig. 3

Variograms of input chalky strata density 3D data at the Rivne NPP was built by using the *R* software and *geoR* package. They corresponding to the: Bessel (1) correlation function (the mean square approximation is 0,0008599) and Cauchy (2) correlation function (the mean square approximation is 0,002816). Variograms plots were presented at Fig. 4, a, that according to Bessel type of correlation function, and at Fig. 4, b, that according to Cauchy type of correlation function for the random component of investigation 3D data.

The built variogram (Fig. 5) of input chalky strata density 3D data has the best approximation by theoretical variogram which is connected to the spherical correlation function (7) with parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$ (a mean square deviation is $1,42 \cdot 10^{-3}$).

We have, that the built variogram of implementations on the study area (Fig. 6) has enough adequate approximation by theoretical variogram which is connected to the spherical correlation function (a mean square deviation is $4,8 \cdot 10^{-4}$).

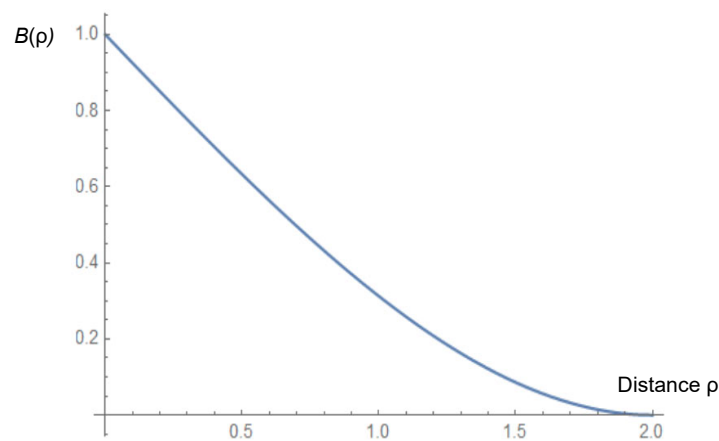


Fig. 3. The spherical type function (3) at parameter value $a = 2$

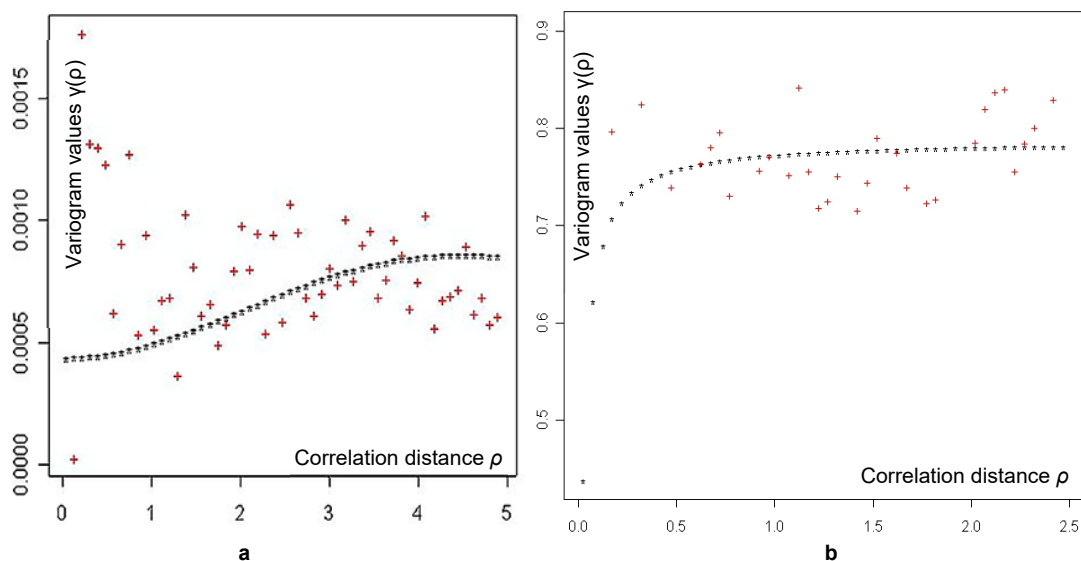


Fig. 4. Empirical (rcrosses) and theoretical (curve) variograms for input data of the chalky strata, that corresponding to the: a – the Bessel (1) correlation function; b – the Cauchy (2) correlation function

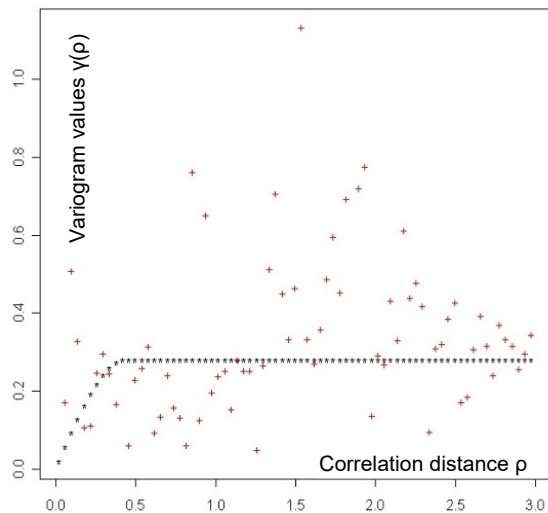


Fig. 5. Empirical (crosses) and theoretical (curve) variograms of input data arrays of chalk layer density, corresponding to spherical correlation function ($a \approx 1, 25 \cdot 10^{-2}$)

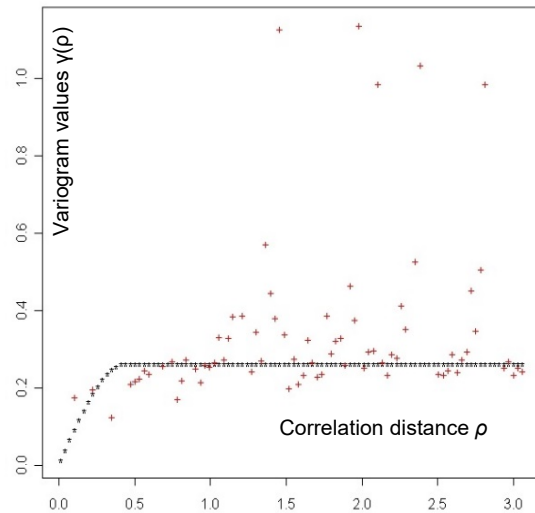


Fig. 6. Empirical (crosses) and theoretical (curve) variograms of simulated data arrays of chalk layer density, corresponding to spherical correlation function ($a \approx 1, 25 \cdot 10^{-2}$)

The spectral representation of homogeneous isotropic random fields, approximation theorem, model and statistical simulation algorithm for the spherical correlation function.

Now we will give the same theorem from spectral theory. We consider a real-valued homogeneous isotropic random field $\zeta(r, \theta, \varphi)$ in the 3D area (r , – spherical coordinates). It is known (Yadrenko, 1983; Vyzhva, 2003; Vyzhva, 2011, p. 208) that square-mean continuous real-valued isotropic random field $\zeta(r, \theta, \varphi)$, that is in 3D Euclidean space R^3 , admit the spectral decomposition by spherical harmonics.

The correlation function of the homogeneous isotropic random field $\zeta(r, \theta, \varphi)$ in 3D area $B(\rho)$ depends on distance ρ between the vectors $x, y \in R^3$ ($x = (r, \theta_1, \varphi_1)$, $y = (r, \theta_2, \varphi_2)$) $\rho = r\sqrt{2(1 - \cos \psi)} = r \sin(\psi/2)$, where $\cos \psi$ – angular distance between vectors $x, y \in R^3$:

$$\cos \psi = \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2).$$

However, there is used the spectral decomposition of this random field by solution problems of statistical simulation of random field realizations in 3D space, on this figure real-valued random variables. Let adduce that decomposition.

Theorem 1. Let a mean square continuous realvalued homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ is in 3D space with zero mean. Then this random field admits (Vyzhva, 2011, p. 210) the following spectral decomposition:

$$\xi(r, \theta, \varphi) =$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^m \tilde{c}_{m,l} P_m^l(\cos \theta) [\zeta_{m,1}^l(r) \cos l\varphi + \zeta_{m,2}^l(r) \sin l\varphi], \quad (4)$$

where $P_m^l(x)$ is associated Legendre functions of degree m ,

$\tilde{c}_{m,l}$ – constants sequences are calculated by the formula:

$$\tilde{c}_{m,l} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_l}{\pi} \frac{(m-l)!}{(m+l)!} (2m+1)}, \quad v_l = \begin{cases} 1, & l \neq 0, \\ 2, & l = 0; \end{cases} \quad (5)$$

random processes sequences $\{\zeta_{m,k}^l(r)\}$ ($k = 1, 2$):

$$\zeta_{m,k}^l(r) = \int_0^{\infty} \frac{J_{m+\frac{1}{2}}(\lambda r)}{(\lambda r)^{\frac{1}{2}}} Z_{m,k}^l(d\lambda),$$

such that satisfying the following conditions:

$$1) M \zeta_{m,k}^l(r) = 0;$$

$$2) M \zeta_{m,k}^l(r) \zeta_{m',k'}^{l'}(r) = \delta_l^{l'} \delta_m^{m'} \delta_k^{k'} b_m(r), \quad (6)$$

where $\delta_m^{m'}$ – Kronecker symbol, $b_m(r)$ – the spectral coefficients and $\{Z_m^l(\cdot)\}$ is a sequence of orthogonal random measures on Borel subsets from the interval $[0, +\infty)$, i. e.

$$E Z_m^l(S_1) Z_{m'}^{l'}(S_2) = \delta_l^{l'} \delta_m^{m'} \Phi(S_1 \cap S_2),$$

for any Borel subsets S_1 and S_2 ,

where $\Phi(\lambda)$ is the bounded nondecreasing function so-called spectral function of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$.

The spectral density of homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ is defined as $f(\lambda) = d\Phi(\lambda) / d\lambda$ and it is obtained by correlation function of this random field as integral:

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} \rho \lambda \sin(\lambda \rho) B(\rho) d\rho \quad (7)$$

The spectral coefficients $b_m(r)$ of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ are defined by the spectral density $f(\lambda)$ of this random field in 3D space in the way:

$$b_m(r) = \int_0^{\infty} \frac{J_{m+\frac{1}{2}}^2(\lambda r)}{\lambda r} f(\lambda) d\lambda. \quad (8)$$

Further, the statistical simulation of homogeneous isotropic random fields in the 3D space on the basis the spectral decomposition (4) coefficients (8) are considered.

Approximation **model** for the homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ is build by using the partial sums of series (1) and is presented by the formula:

$$\xi_N(r, \theta, \varphi) =$$

$$= \sum_{m=0}^N \sum_{l=0}^m c_{m,l} P_m^l(\cos \theta) [\zeta_{m,1}^l(r) \cos l\varphi + \zeta_{m,2}^l(r) \sin l\varphi], \quad (9)$$

$$N \in \mathbb{N}$$

We need the mean square approximation of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ by model (9) in the convenient form for the constructing statistical simulation of homogeneous isotropic random field realizations in the 3D space algorithm.

Further, we used the mean square estimate from the paper (Vyzhva *et al.*, 2018), that we have in following theorem.

Theorem 2. Let a mean square continuous realvaluedisotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ on the sphere $S_3(r)$ in 3D space with zero mean (r – radius of sphere). If $\mu_3 < +\infty$, then the mean square approximation of this random field by model (9) is such that

$$M[\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)]^2 \leq \frac{5\pi r^3}{2N^2} \mu_3, \quad (10)$$

where

$$\mu_3 = \int_0^\infty \lambda^3 \Phi(d\lambda). \quad (11)$$

If we proposed, that r (radius of sphere) is not fixed, then the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ is in 3D Euclidean space R^3 .

$$b_m(r) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{J_{m+\frac{1}{2}}^2(\lambda r)}{\lambda^2 r} \left[\left(\frac{a+16}{2\lambda^3} - \frac{4a+1}{a\lambda} \right) \cos(\lambda a) + \frac{24}{\lambda^2} (a \sin(\lambda a) - 1) + \frac{3}{a} \right] d\lambda. \quad (13)$$

These spectral coefficients are calculated by Mathematica software for density chalky strata data.

The numerical simulation procedure of random field in 3D area with the spherical correlation function.

In this paper we generated the realizations of homogeneous isotropic random field in 3D area with the spherical correlation function (3) at the values of parameter $a \approx 1$, $25 \cdot 10^{-2}$. The statistical simulation of density chalky strata data at the Rivne NPP object was performed by the technique of spectral decomposition and finding of spectral coefficients.

The procedure of numerical simulation the realizations of the 3D data field random component, by means of the abovementioned model (9), was conducted, which is described in (Vyzhva *et al.*, 2018).

$$\mu_3 = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \lambda^2 \left[\left(\frac{a+16}{2\lambda^3} - \frac{4a+1}{a\lambda} \right) \cos(\lambda a) + \frac{24}{\lambda^2} (a \sin(\lambda a) - 1) + \frac{3}{a} \right] d\lambda, \quad k=1, 2.$$

We define dependence number N on r and ε in the case of spherical correlation function (3) as a following:

$$N(r, \varepsilon) \geq \sqrt{\frac{5\pi r^3}{2\varepsilon}} \mu_3. \quad (15)$$

The statistical simulation procedure of Gaussian homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ in 3D area with spherical correlation function (3) was built by means of the model (9) and the estimate (13). This random field is determined by its statistical characteristics: the

$$\mu_3 = \frac{2}{\pi} \int_0^K \lambda^2 \left[\left(\frac{a+16}{2\lambda^3} - \frac{4a+1}{a\lambda} \right) \cos(\lambda a) + \frac{24}{\lambda^2} (a \sin(\lambda a) - 1) + \frac{3}{a} \right] d\lambda, \quad K = K(a) - const.$$

2. We calculate the spectral coefficients $b_m(r)$, $m = 0, 1, 2, \dots, N$ for the spherical correlation function (3) as integral (13).

3. We simulate the sequences of independent Gaussian normal random variables:

$$\{\xi_{m,k}^l(r)\}, \quad k=1, 2; \quad m=0, 1, 2, \dots, N; \quad l=1, \dots, m;$$

that satisfying the following conditions (6) with spectral coefficients (13).

4. We calculate the realization of the stochastic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ by formula (9) in given point $(r_i, \theta_j, \varphi_p)$, $i=1, 2, \dots, I$;

Further, we described the algorithm for the statistical simulation of realizations of Gaussian homogeneous isotropic random fields $\xi(r, \theta, \varphi)$ in 3D Euclidean space R^3 , which was constructed on the basis of model (9) and estimate (10)

We constructed in this paper the algorithm for the statistical simulation of Gaussian homogeneous isotropic random field on 3D space with spherical correlation function (3).

The spectral density is obtained for spherical correlation function (3) by means the formula (7) as:

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi \lambda} \left[\left(\frac{a+16}{2\lambda^3} - \frac{4a+1}{a\lambda} \right) \cos(\lambda a) + \frac{24}{\lambda^2} (a \sin(\lambda a) - 1) + \frac{3}{a} \right]. \quad (12)$$

The spectral coefficients, which correspond to the spherical correlation function (3) of homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$, are calculated by the formula (7) and we have:

The value of number N for the constructed model is determined by the inequality, which is the estimate of the mean square approximation of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ by partial sums $\xi_N(r, \theta, \varphi)$. This number N corresponds to the prescribed small number ε (approximation accuracy). The mentioned inequality was obtained in theorem 2. Consequently, the estimate of the mean square approximation of the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ with spherical type correlation function (3) by the partial sums $\xi_N(r, \theta, \varphi)$ has the following representation:

$$M[\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)]^2 \leq \frac{5\pi r^3}{2N^2} \mu_3, \quad (14)$$

where

mathematical expectation and the spherical correlation function $B(\rho)$ (3) at the value of parameter $a \approx 1$, $25 \cdot 10^{-2}$.

Algorithm.

1. Natural number N (border of summation) is chosen according to necessary accuracy $\varepsilon > 0$ of approximation the model (9) mentioned below:

$$\frac{5\pi r^3}{2N^2} \mu_3 \leq \varepsilon, \quad (16)$$

where

$j=1, 2, \dots, G$; $p=1, 2, \dots, P$ in the 3D observations area by means of substituting in it values from the previous items 1, 2 and 3, numbers N and sequences of Gaussian random variables.

5. We check whether the realization of the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ generated in step 4 fits the data by testing the corresponding statistical characteristics (distribution and correlation function).

The statistical simulation of realizations of the Gaussian isotropic random fields $\xi(r, \theta, \varphi)$ with spherical correlation function can be done by means of this algorithm.

Note that the procedure can be applied to random fields with another type of distribution. Then the sequences of random variables $\{\zeta_{k,i}(r), i = 1, 2; k = 0, 1, 2, \dots, N(r, \varepsilon)\}$ should be distributed by corresponding type of distribution.

The original Spectr software, which based on the results of the statistical data processing and the mentioned algorithm for the simulation values of such data realization in the 3D area, was developed in Python, where selected spherical type correlation function (3) was used. We calculate realizations of the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ in 100 points for each of 3 observations levels $(r_i, \theta_j, \varphi_p), i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, G; p = 1, 2, \dots, P$ in 3D are a by means of this software. The statistical estimate of the correlation function is obtained by these realizations. This estimate compares with a given spherical type correlation function (3) at the value of parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$ and provides the statistical analysis the adequacy of realizations. The built variogram of

these realizations on the study area (Fig. 6) has adequate approximation by theoretical variogram which is connected to the spherical correlation function. The results present that the chosen model of the density chalky strata data at the Rivne NPP object is adequate enough. The developed Spectr software works with sufficient accuracy.

The results, which were obtained by the simulating procedure, are displayed in Fig. 7. Fig. 7, a presents an example of constructed chalky strata density map according to observations data boreholes (averaged data over the years to 29 boreholes at 28 m) by Surfer software. Using available data the accuracy of this construction cannot provide a reliable characteristic of the chalky strata status, because the number of measurement results is not sufficient.

Fig. 7, b presents the contours of equal chalky strata density values that based on simulated data including values of the anchor boreholes by means of calculating the spectral coefficients of the spherical type. Additionally, the output data (100 simulated values in intervals between the observation points of this level) can have more reliable approximation that enables more informed decisions about the status of chalky strata and determines places for testing and additional research.

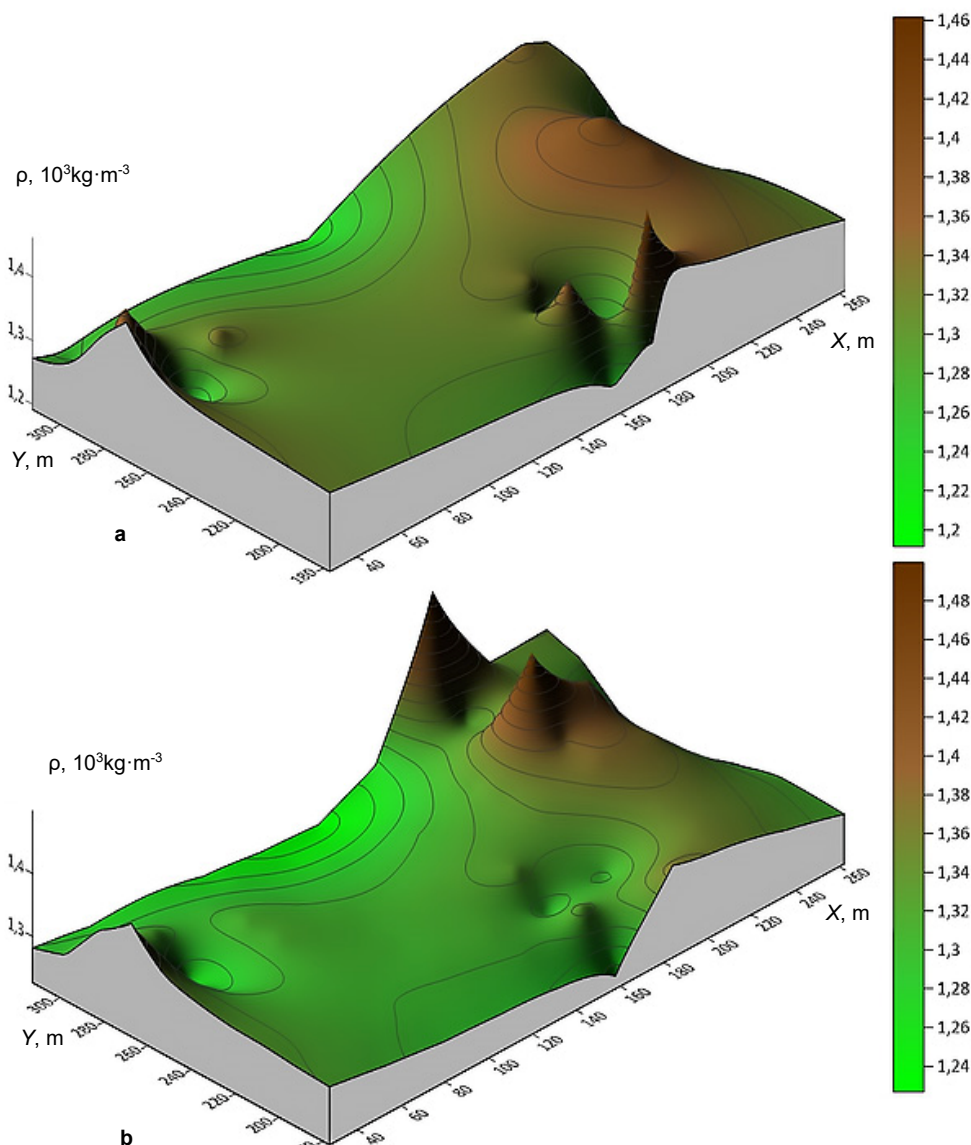


Fig. 7. The distribution of chalky strata density is on the industrial area of Rivne nuclear power plant at a depth of 28 m from the surface, according to (a) the averaged data of 29 observational boreholes over 1984–2004 years, for (b) the simulated data that based on the values in secure boreholes by spectral coefficients the spherical type

The following results, which were obtained by the simulating procedure for observations data boreholes (averaged data over the years to 29 boreholes at 29 m, are displayed in Fig. 8. Fig. 8, a presents an example of constructed chalky strata density map according to observations for this data by Surfer software. Fig. 8, b

presents the contours of equal chalky strata density values that based on simulated data including values of the anchor boreholes. Additionally, the output data (100 simulated values in intervals between the observation points of this level) can have more reliable approximation that enables more informed decisions about the status of chalky strata.

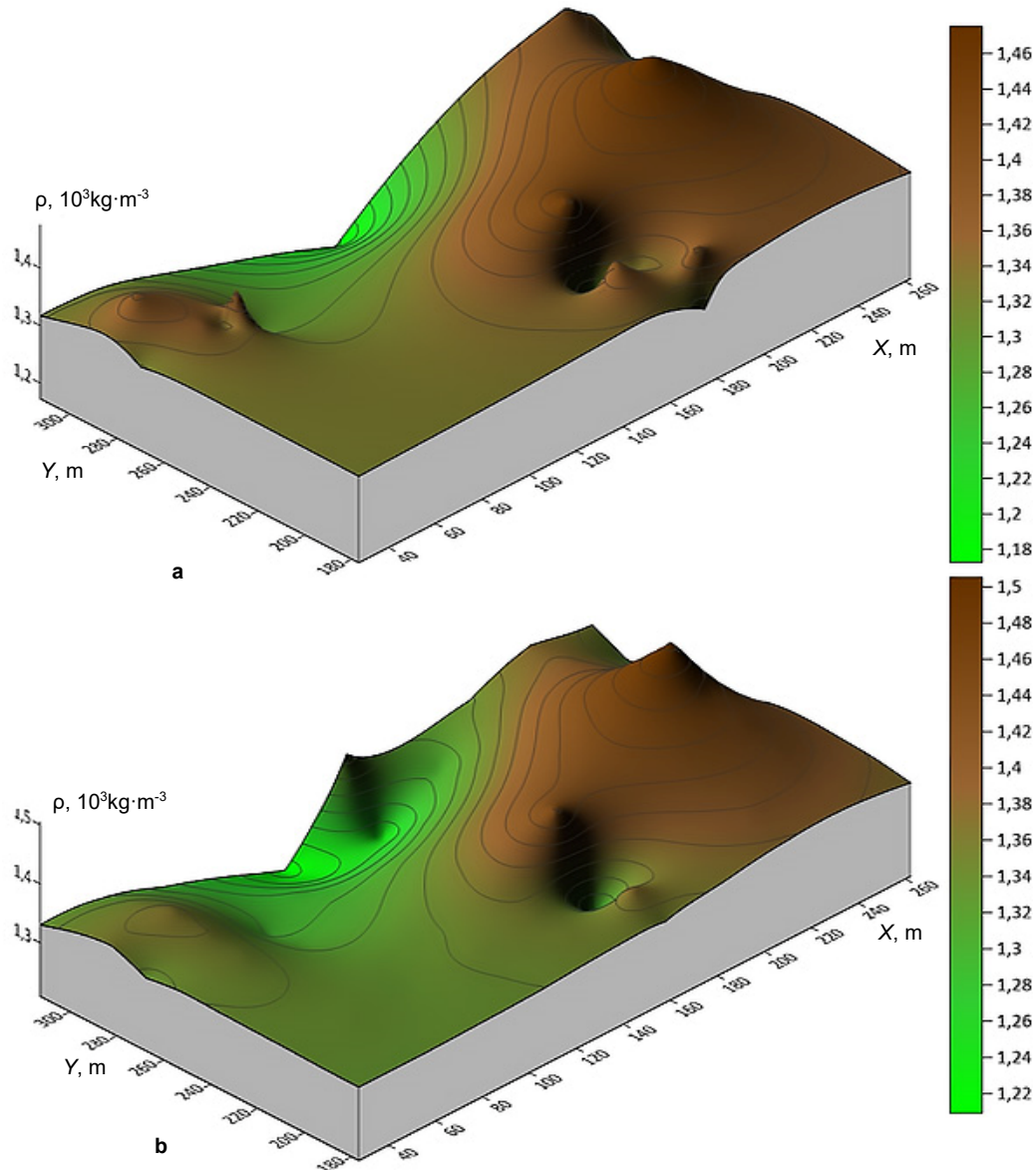


Fig. 8. The distribution of chalky strata density is on the Rivne NPP object at a depth of 29 m from the surface, according to (a) the averaged data of 29 observational boreholes over 1984–2004 years, for (b) the simulated data that based on the values in secure boreholes by spectral coefficients the spherical type

Finally, the results, which were obtained by the simulating procedure for observations data boreholes (averaged data over the years to 29 boreholes at 30 m, are displayed in Fig. 9. Fig. 9, a presents an example of constructed chalky strata density map according to observations for this data by Surfer software. Fig. 9, b presents the contours of equal chalky strata density values that based on simulated data including values of the anchor boreholes. Additionally, the output data (100 simulated values in intervals between the observation points of this level) can have more reliable approximation that enables more informed decisions about the status of chalky strata.

The statistical estimate of the correlation function is obtained by distribution of chalky strata density data realization in the 3D area on the Rivne NPP object. This estimate compares with a given spherical correlation

function (3) at the value of parameter $a \approx 1, 25 \cdot 10^{-2}$ and provides the statistical adequacy analysis of realizations. The built variogram of these realizations on the study area (Fig. 6) has adequate approximation by theoretical variogram, which is connected to the spherical correlation function. The results present that the chosen model of the data is adequate enough. The developed Spectr software works with sufficient accuracy.

Conclusions. The theory, techniques and procedure of statistical simulation of random fields in 3D area by using optimal in the mean square sense the spherical correlation function can significantly increase the effectiveness of monitoring observations on the territory of potentially dangerous objects. This makes it possible to simulate values in the area between regime observation grids and abroad, more adequately describe chalky strata density 3D

data on the industrial area of Rivne nuclear power plant. Because the variogram of input data has the best approximation by theoretical variogram which is connected to the spherical correlation function with a mean square deviation 0,00048, if compare the mean square approximation for Cauchy correlation function – 0,002816 and 0,0008599 – for Bessel type of correlation function.

The method of statistical simulation of random fields with the spherical correlation functions allows complementing data with a given accuracy. It can also be used to detect abnormal areas.

There are many other areas of statistical simulation methods application in geosciences. Among them primary are soil science and environmental magnetism (Menshov et al., 2015).

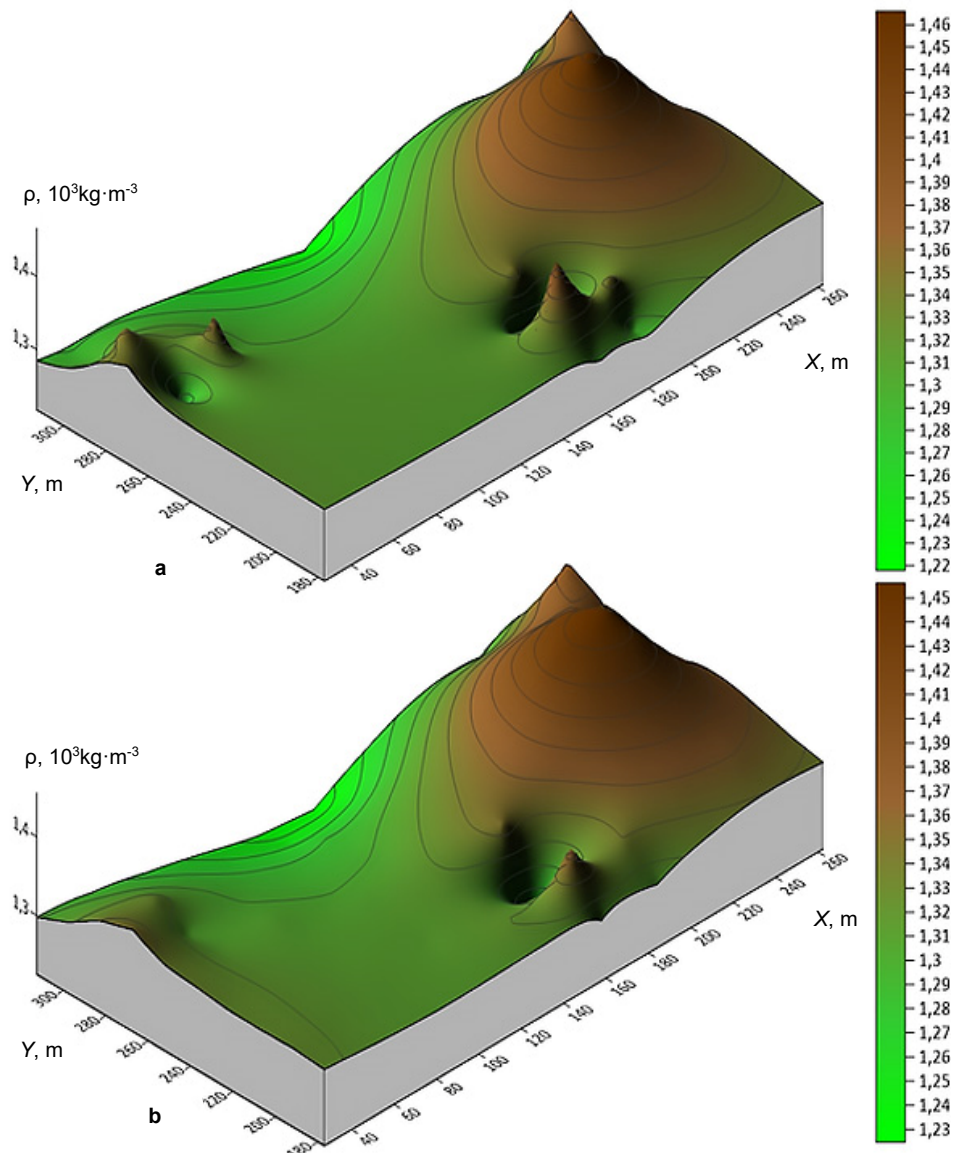


Fig. 9. The distribution of chalky strata density is on the industrial area of Rivne nuclear power plant at a depth of 30 m from the surface, according to (a) the averaged data of 29 observational boreholes over 1984–2004 years, for (b) the simulated data that based on the values in secure boreholes by spectral coefficients the spherical type

References

- Chiles, J.P., Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. New York, Toronto, John Wiley & Sons, Inc., 2-nd ed.
- Emery, X., Lantuejoul, C. (2006). TBSIM: A computer program for conditional simulation of three-dimensional Gaussian random fields via the turning bands method. *Computer and Geosciences*, 32, 10, 1615–1628.
- Mantoglov, A., Wilson, John L. (1981). Simulation of random fields with turning bands method. *MIT Ralph M. Parsons Lab. Hydrol. And Water Syst. Rept.*
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2015) Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.
- Prigarin, S.M. (2005). *Numerical Modeling of Random Processes and Fields*. Novosibirsk : Inst. Of Comp. Math. And Math. Geoph. Publ. [In Russian]
- Vyzhva, Z.O. (2003). About Approximation of 3D Random Fields and Statistical Simulation. *Random Operator and Stochastic Equation*, 4, 3, 255–266.
- Vyzhva, Z.O. (2011). *The Statistical Simulation of Random Processes and Fields*. Kyiv: Obrii. [In Ukrainian]
- Vyzhva, Z.O., Demidov, V.K., Vyzhva, A.S. (2013). About methods of 3D dataset statistical simulation on Rivne NPP example. *GeoInformatics. XII International Conference on GeoInformatics: Theoretical and Applied Aspects*.

Vyzhva, Z.O., Demidov, V.K., Vyzhva, A.S. (2014, a). The investigation of chalk layer density on Rivne NPP industrial area territory by Monte Carlo method using 3D models. *GeoInformatics*, 3(51), 47–56. [In Ukrainian]

Vyzhva, Z.O., Demidov, V.K., Vyzhva, A.S. (2014, b). Monte Carlo method and Cauchy model identifying chalk layer density on Rivne NPP. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (65), 62–67. [In Ukrainian]

Vyzhva, Z.O., Demidov, V.K., Vyzhva, A.S. (2018). About statistical simulation methods of random fields on the sphere by the aircraft magnetometry data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(82), 107–113.

Vyzhva, Z.O., Demidov, V.K., Vyzhva, A.S. (2019). About statistical simulation algorithm of dataset in 3D area with spherical correlation function on Rivne NPP example. *GeoInformatics. XVIIIth International Conference on GeoInformatics: Theoretical and Applied Aspects*.

Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics*, third edition. Berlin : Springer-Verlag.

Yadrenko, M. Y. (1983). *Spectral theory of random fields*. Optimization Software Inc., Publications Division, New York.

Список використаних джерел

- Вижва, З.О. (2011). Статистичне моделювання випадкових процесів та полів. К.: Обрії.
- Вижва, З.О., Демидов, В.К., Вижва, А.С. (2014, а). Дослідження густини крейдяної товщі методом Монте-Карло на проммайданчику Рівненської АЕС із застосуванням 3D моделей. *Геоінформатика*, 3(51), 47–56.
- Вижва, З.О., Демидов, В.К., Вижва, А.С. (2014, б). Дослідження густини крейдяної товщі методом Монте-Карло на проммайданчику Рівненської АЕС із застосуванням моделі Коші. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 2(65), 62–67.
- Пригарин, С. М. (2005). Методы численного моделирования случайных процессов и полей. Новосибирск: Изд-во ИВМ и ИГ.
- Chiles, J.P., Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. New York, Toronto, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition.
- Emery, X., Lantuejoul, C. (2006). TBSIM: A computer program for conditional simulation of three-dimensional Gaussian random fields via the turning bands method. *Computer and Geosciences*, 32, 10, 1615–1628.
- Mantoglov, A., Wilson, John L. (1981). Simulation of random fields with turning bands method. *"MIT Ralph M. Parsons Lab. Hydrol. and Water Syst. Rept"*, 264.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.
- Vyzhva, Z.O. (2003). About Approximation of 3D Random Fields and Statistical Simulation. *Random Operator and Stochastic Equation*, 4, 3, 255–266.
- Vyzhva, Z.O., Demidov, V.K., Vyzhva, A.S. (2013). About methods of 3D dataset statistical simulation on Rivne NPP example. *Geoinformatics. XII International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*.
- Vyzhva, Z.O., Demidov, V.K., Vyzhva, A.S. (2018). About statistical simulation methods of random fields on the sphere by the aircraft magnetometry data. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 3(82), 107–113.
- Vyzhva, Z.O., Demidov, V.K., Vyzhva, A.S. (2019). About statistical simulation algorithm of dataset in 3D area with spherical correlation function on Rivne NPP example. *Geoinformatics. XVIIIth International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*.
- Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics*, third edition. Berlin: Springer-Verlag.
- Yadrenko, M. Y. (1983). *Spectral theory of random fields*. Optimization Software Inc., Publications Division, New York.

Надійшла до редколегії 17.09.2020

З. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.,

E-mail: zoia_vyzhva@ukr.net;

В. Демидов, канд. фіз.-мат. наук, доц.,

E-mail: fondad@ukr.net;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

А. Вижва, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: motomustanger@ukr.net;

ДП "Науканафтогаз"

СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДАНИХ У 3D ОБЛАСТІ ЗІ СФЕРИЧНОЮ КОРРЕЛЯЦІЙНОЮ ФУНКЦІЄЮ НА ПРИКЛАДІ РІВНЕНСЬКОЇ АЕС

У зв'язку з ростом кількості природно-техногенних катастроф актуальною є розробка систем моніторингу за станом геологічного середовища з використанням сучасного математичного апарату та інформаційних технологій. У загальній системі моніторингу докліла важливою складовою є локальний моніторинг територій розташування потенційно небезпечних об'єктів.

На території розміщення Рівненської АЕС проводився комплекс геофізичних досліджень. Серед цих моніторингових спостережень найбільший інтерес являють собою радіоізотопні дослідження густини та вологості ґрунтів по периметру збудованих споруд. При цьому виникла потреба доповнення моделювання даних, які отримано при контролі зміни густини крейдяної товщі на території досліджуваного проммайданчика з використанням радіоізотопних методів по сітці, що включала 29 свердловин. Таку проблему було розв'язано в роботі методом статистичного моделювання, який надає можливість відображати явище (випадкове поле об'єкта дослідження в тримірній області) у будь-якій точці області спостереження. При цьому моделювалися усереднені значення густини крейдяної товщі на території проммайданчика з використанням побудованої моделі та залученням оптимальної в середньому квадратичному наближенні сферичної кореляційної функції.

Наведено розроблений алгоритм і приклад статистичного моделювання карстово-суфозійних явищ у задачі моніторингу густини крейдяної товщі на території Рівненської АЕС. За спектральним розкладом побудовано статистичну модель розподілу усередненої густини крейдяної товщі в тримірній області та розроблено алгоритм статистичного моделювання з використанням сферичної функції. На базі розробленого програмного забезпечення отримано реалізації предмета дослідження на сітці спостережень необхідної деталізації та регулярності. Проведено статистичний аналіз результатів чисельного моделювання та їхня перевірка на адекватність.

Ключові слова: статистичне моделювання, сферична кореляційна функція, спектральний розклад, кондиційність карт.

З. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.,

E-mail: zoia_vyzhva@ukr.net;

В. Демидов, канд. фіз.-мат. наук, доц.,

E-mail: fondad@ukr.net;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, г. Київ, 03022, Україна;

А. Вижва, канд. фіз.-мат. наук, ст. науч. сотр.,

e-mail: motomustanger@ukr.net;

ГП "Науканафтогаз"

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ В 3D ОБЛАСТИ СО СФЕРИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИЕЙ НА ПРИМЕРЕ РОВЕНСКОЙ АЭС

В связи с ростом количества природно-техногенных катастроф актуальной является разработка систем мониторинга за состоянием геологической среды с использованием современного математического аппарата и информационных технологий. В общей системе мониторинга окружающей среды важная составляющая – это локальный мониторинг территории размещения потенциально опасных объектов.

На территории расположения Ровенской АЭС проводился комплекс геофизических исследований. Среди этих мониторинговых исследований наибольший интерес представляют радиоизотопные исследования плотности и влажности грунтов по периметру построенных сооружений. При этом возникла необходимость дополнения моделированием данных, полученных при контроле изменения плотности меловой толщи на территории исследуемой промплощадки с использованием радиоизотопных методов по сетке, включающей 29 скважин. Эта проблема была решена в работе методом статистического моделирования, который даёт возможность отображать явление (случайное поле объекта исследования в трёхмерной области) в любой точке области наблюдения. При этом моделировались усреднённые значения плотности меловой толщи на территории промплощадки с использованием построенной модели с привлечением сферической корреляционной функции.

Приведен разработанный алгоритм и пример статистического моделирования карстово-суффозионных явлений в задаче мониторинга плотности меловой толщи на территории Ровенской АЭС. По спектральному разложению построена статистическая модель распределения плотности меловой толщи в трёхмерной области и разработан алгоритм статистического моделирования с использованием сферической корреляционной функции. На базе разработанного программного обеспечения получены реализации предмета исследования на сетке наблюдений в трёхмерной области необходимой детализации и регулярности. Проведен статистический анализ результатов численного моделирования и их проверка на адекватность.

Ключевые слова: статистическое моделирование, сферическая корреляционная функция, спектральное разложение, кондиционность карт.

УДК 528.88

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.13>

Є. Углицьких, асп.,
E-mail: evgeniyuglitskih1993@gmail.com;
С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vyzhvas@gmail.com;
О. Іванік, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com;

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

МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ТЕРИТОРІЇ ЗАКАРПАТТЯ ЗА ДАНИМИ РАДАРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

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

Представлено результати моніторингу деформацій земної поверхні території Закарпаття, виконаного за допомогою методу радарної інтерферометрії. Метод радарної інтерферометрії дозволяє здійснювати моніторинг зміщень земної поверхні в режимі реального часу і оперативно отримувати актуальні дані. На основі проведених досліджень Карпатського модельного полігону було опрацьовано 26 пар інтерферограм за період 2016–2018 рр. і побудовано загальну карту вертикальних зміщень земної поверхні полігону. Виконано ранжування території на три зони згідно з показниками вертикальних зміщень земної поверхні. Підтверджено, що використання даних інтерферометрії є ефективним для детального аналізу режиму та динаміки небезпечних геологічних процесів, зокрема для розвитку зсувів. Дані зйомки мають практичну цінність і за хорошої розрізненості та відповідного алгоритму обробки дають обґрунтовані результати, які в поєднанні з даними літолого-стратиграфічних, геоморфологічних і структурно-тектонічних досліджень можуть бути використані для прогнозування небезпечних геологічних процесів і мінімізації їхнього негативного впливу на природно-техногенні системи.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, інтерферометрія, зміщення земної поверхні, небезпечні геологічні процеси

Вступ. У зв'язку з постійним зростанням кількості надзвичайних ситуацій, спричинених природними і техногенними процесами, актуальною є розробка та широке застосування нових методів і технологій моніторингу та прогнозування таких небезпечних геологічних процесів, як зсуви, обвали, селеві явища та ін. Для вирішення цих завдань використовуються різні методи і підходи, ефективність яких визначається як особливостями перебігу цих процесів, так і апаратними та програмними можливостями різних засобів. На сьогодні для вирішення завдань дослідження режиму та динаміки небезпечних явищ, а також оцінки їхнього впливу на техногенні об'єкти різного призначення ефективним є використання космічних методів дистанційного зондування, перш за все радіолокаційних методів, та їхнє поєднання з оптичними методами.

Використання з цією метою методів радарної інтерферометрії є достатньо поширеним (Hooper et al., 2012).

Супутникова радарна інтерферометрія – метод вимірювань, що використовує ефект інтерференції електромагнітних хвиль (Bawden et al., 2001). Основна ідея методу полягає у формуванні інтерферограми, яка являє собою результат комбінації двох радіолокаційних зображень однієї й тієї ж території (рис. 1), що містять інформацію про амплітуду і фазу сигналу, і отриманих ідентичними радарми з близько розташованих точок орбіти (Ashkenas, 1950; Hanssen, 2001). Інтерферометричний радар із синтезованою апертурою (Інсар) використовує різницю фаз між двома комплексами радарних SAR спостережень, виконаних із кількох різних положень датчиків.

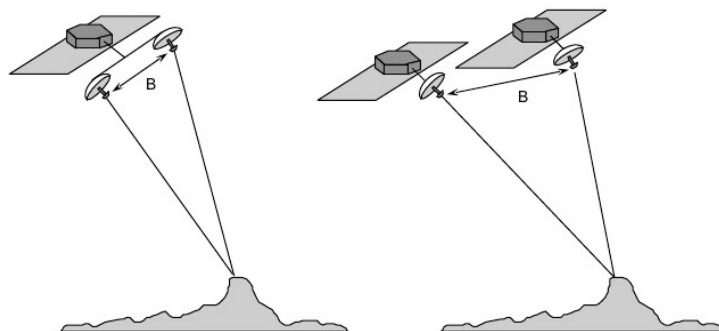


Рис. 1. Принцип роботи радарної інтерферометрії: на першому етапі радарні супутники формують знімок поверхні, на другому етапі через деякий час вони роблять повторний знімок з іншою відстанню між ними (B). Інтерферограма, яка формується на основі цих даних і є показником змін, що зазнала земна поверхня за час дослідження (за <https://volcanoes.usgs.gov/volcanoes/yellowstone/monitoring.html>)

Використання радіохвиль дозволяє радарним системам отримати інформацію про положення земної поверхні через хмарність і в темний час доби, що, наприклад, робить можливим постійний моніторинг льодової обстановки під час полярної ночі (Lu et al., 2002). Однак ще більш істотно те, що радари здатні вимірювати не тільки амплітуду, але й точний момент коливань – фазу відображених хвиль. Сигнал SAR містить амплітудну і фазову інформацію. Амплітуда – це сила відгуку радара, а фаза являє собою частку одного повного циклу синусоїдальної хвилі (одна довжина хвилі SAR). Фаза зображення SAR визначається в основному відстанню між супутниковою

антенною і наземними об'єктами (Breining, 2007; Chevalerias et al., 1957). Об'єднавши фази цих двох зображень після корекції, інтерферограма може бути згенерована фазою, пов'язаною з топографією місцевості.

Радарна інтерферометрія має на меті аналіз вертикальних зміщень земної поверхні та застосовується переважно для:

- створення цифрових моделей рельєфу, зокрема високоточних (із просторовою роздільною здатністю близько метра і точністю визначення висоти близько 1–2 метрів);

• вимірювання деформацій відбивної поверхні з точністю до порядку довжини хвиль радара, зокрема:

- моніторинг наслідків землетрусів;
- моніторинг передумов і наслідків вулканічної активності;
- виявлення просідання, деформації споруд;
- моніторинг динаміки рівня моря;
- моніторинг гравітаційних геологічних процесів;
- високоточні вимірювання затримок радіосигналів в атмосфері (безпосередньо пов'язані з розподілом в атмосфері водяної пари);
- моніторинг наслідків сільськогосподарської діяльності та ін. (Massonnet, Feigl, 1998; Rucci et al., 2012).

Моніторинг на основі радіолокаційної інтерферометрії відносно дешевий, не вимагає установки спеціального обладнання і проведення польових робіт, а використання архівних знімків дозволяє досліджувати поведінку об'єктів до і після катастрофічних подій. Цим метод інтерферометрії вигідно відрізняється, наприклад, від методів моніторингу із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем (ГЛОНАСС і GPS). Водночас для отримання надійних результатів за методом інтерферометрії необхідні контроль і калібрування із застосуванням наземних даних (Monnier, 2003; Paschotta, 2012).

Головною метою даних досліджень є аналіз режиму і динаміки небезпечних геологічних процесів Карпатського модельного полігону за даними радарних інтерферометричних досліджень та оцінка їхнього впливу на інфраструктурні об'єкти.

Загальна характеристика впливу небезпечних геологічних процесів на інфраструктурні об'єкти в межах Карпатського модельного полігону. Українські Карпати є одним із регіонів розвитку несприятливих стихійних явищ, де активізація небезпечних геологічних процесів та їхній вплив на численні техногенні об'єкти створює низку економічних та екологічних проблем. Так, за даними Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи тільки в межах Закарпатської області щорічно виникає значна кількість надзвичайних ситуацій, зумовлених природними чинниками. Серед них переважають небезпечні геологічні процеси. Сума збитків, завданих цими процесами об'єктам господарювання, становить десятки мільйонів гривень на рік. Тому з'ясування природи небезпечних геологічних явищ, оцінка їхніх просторово-часових закономірностей є нагальною проблемою і потребує глибоких комплексних аналітичних досліджень.

Вивчення та аналіз різноманітних факторів формування негативних явищ у Карпатах здійснювались як численними виробничими та науковими установами, так і окремими дослідниками. У результаті створено величезну інформаційну базу з поширення цих явищ та їхніх характеристик, насамперед зсувних, селевих процесів, річкової ерозії, обвалів тощо (Багрій та ін., 2004; Демчишин, 2004; Климчук та ін., 2008; Ivanik et al., 2019). Більшість досліджень має регіональний характер, метою яких є аналіз дрібномасштабних геолого-геоморфологічних матеріалів і створення карт поширення екзогенних процесів. Проведення ж детальних спеціалізованих досліджень з вивчення небезпечних геологічних процесів на конкретних полігонах демонструє необхідність і доцільність детального комплексного аналізу геологічних і геоморфологічних факторів їхнього формування, що значно підвищує об'єктивність як їхньої загальної оцінки, так і прогнозу в межах певних територій. При цьому застосування методів дистанційного зондування, зокрема методів радарної інтерферометрії, дає можливість детального аналізу режиму та динаміки геологічних процесів з

можливістю кількісної характеристики динамічних змін протягом певного проміжку часу.

Територія дослідженого полігону в адміністративному відношенні займає частину Свалявського та Воловецького районів Закарпатської області та обмежена меридіанами 22°55' та 23°15' сх. д. та паралелями 48°30' та 48°50' пн. ш. (рис. 2). Цей полігон займає площу 804,3 км².

У межах полігону характерною є високий ступінь техногенного навантаження на геологічне середовище, що створює передумови для інтенсифікації небезпечних геологічних процесів і динамічного розвитку природно-технічних систем (ПТС). Високу концентрацію має сітка наземних і підземних комунікацій. Зокрема, у межах полігону проходить магістральна лінія Львівської та Південно-Західної залізниці Москва–Київ–Львів–Чоп, що характеризується регулярністю руху, високою швидкістю перевезень, великою пропускною і провізною спроможністю та є однією з найбільш вантажонапружених ліній цього регіону (Вялов та ін., 1989). Значне поширення у межах району мають також магістральні автомобільні шляхи, зокрема автомобільний шлях міжнародного значення Київ–Чоп, що збігається із частиною Європейського автомобільного маршруту Е50, а також автомобільні дороги місцевого значення. Однією із функціонуючих транспортних ПТС є сітка магістральних газо- та нафтопроводів, що характеризується складними умовами прокладання і, відповідно, проблемним характером експлуатації, періодичним виникненням катастрофічних ситуацій та аварій, зумовлених саме природними чинниками. Ураховуючи зручне географічне положення Закарпатської області, через її територію проходять магістральні газопроводи "Братерство", "Союз", "Прогрес" та Уренгой–Помари–Ужгород загальною довжиною 1177 км, через які транспортується природний газ із Росії у 12 країн Європи, а також постачається газ для потреб споживачів області. По території Свалявського та Воловецького районів проходить також транзитний нафтопровід "Дружба" (його протяжність у Закарпатській області становить 254 км), що є найбільшим у світі. Таким чином, складна газо- та нафтогазотранспортна система створює ефект додаткового навантаження на геологічне середовище, що знижує надійність роботи трубопроводів і може призвести до складних екологічних наслідків. Даний полігон характеризується значною привабливістю і з рекреаційної точки зору. В його межах є велика кількість джерел мінеральних вод (близько 100 мінеральних джерел – майже третина з усіх відомих на Закарпатті), наявність яких послужила базою для побудови багатьох оздоровчих закладів. У зв'язку з цим виникнення будь-яких катастрофічних ситуацій з негативними наслідками погіршує рекреаційний потенціал цієї території й потребує обов'язкової розробки превентивних заходів щодо унеможливлення катастрофічного прояву небезпечних геологічних процесів.

У межах дослідженого регіону зафіксовано понад 200 зсувів, 35 з яких відбулися або були активізовані в 1998 та 2001 рр. унаслідок потужних паводків. Решта зсувів відбулася протягом останніх 30 років і на сьогодні вони є стабілізованими. У результаті було пошкоджено та частково зруйновано будинки, господарські будівлі, автошляхи, мости, трубопроводи. Найбільші пошкодження будинків та автошляхів спостерігалися в населених пунктах Задільське, Підполоззя, Верхні Ворота, Воловець, Абранка Воловецького району та Солочин, Голубине, Поляна, Рудникова Гута Свалявського району. Інтенсивний прояв селевих явищ спостерігався у с. Абранка та інших населених пунктах, дія яких спричинила численні пошкодження господарських будівель, руйнування мостів і призвела до економічних збитків. Повсюдно в межах русл річок і струмків спостерігаються процеси бічної ерозії, що порушує стійкість схилів, а також незначні обвали та осипи.

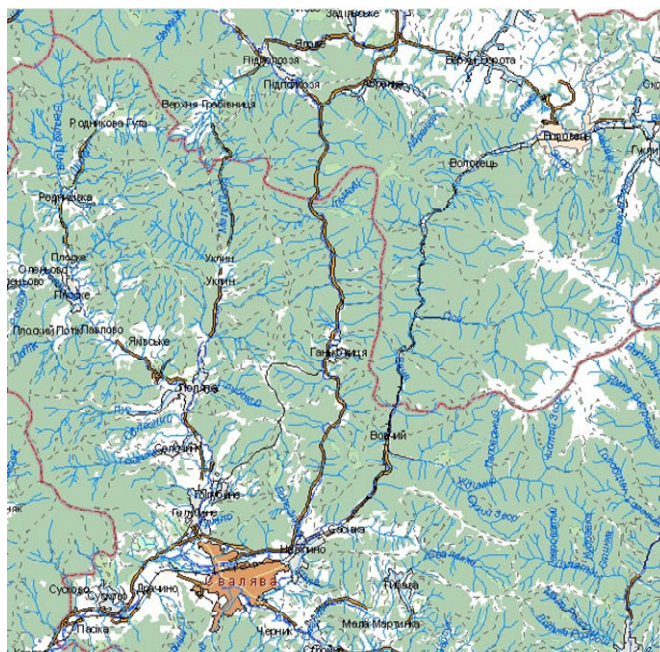


Рис 2. Оглядова карта Карпатського модельного полігону (м-б 1 : 200000)

З геологічної позиції район входить до складу Альпійської геосинкліналі. За сучасним районуванням Українських Карпат територія, що вивчалася, розміщена в межах Східних Карпат і Закарпатської западини. Цей полігон охоплює Дуклянську, Магурську, Поркулецьку структурно-фаціальні зони (Зовнішні Карпати) та Пенінську зону (Внутрішні Карпати), що є одиницями-покривами регіонального простеження з мінливою конфігурацією та різними амплітудами насуну. У геологічній будові території беруть участь утворення двох структурних поверхів. Відклади нижнього структурного поверху представлені карбонатно-теригенними та теригенними мезозой-кайнозойськими формаціями (переважно флішевою). Вони інтенсивно дислоковані й утворюють пакет покривних структур. Основними параметрами літолого-фаціальних відмінностей є речовинний склад порід, їхня ритмічність, забарвлення, вапнистість, кременистість, ступінь збагачення органікою, текстурні особливості, наявність викопних організмів, маркуючих горизонтів (Іванюта та Яковлев, 2014; Рудько та Осіук, 2012). Саме ці характеристики флішевих утворень є визначальними при виникненні різноманітних екзогенних процесів, оскільки різні типи флішу мають значні відмінності у фізико-механічних властивостях порід і відповідно різний ступінь реагування на деструктивні процеси. Відклади верхнього структурного поверху спостерігаються лише на крайньому заході полігону і являють собою неоген-четвертинні осадові, вулканогенні та вулканомікові утворення, що залягають переважно горизонтально. Геоморфологічна будова полігону є типовою для гірських областей з переважанням середньо- та низькогірського ерозійно-тектонічного та денудаційного рельєфу, значною густиною горизонтального розчленування (до 2,5 км/км²), глибиною вертикального розчленування (до 120 м) і крутістю схилів (до 35–40°), що створює "енергію" для розвитку різноманітних екзогенних процесів.

Значний вплив на створення передумов для інтенсифікації несприятливих геологічних явищ Українських Карпат здійснюють новітні та сучасні рухи земної кори, які мають чітку зональність прояву в рельєфі. Неотектонічні рухи виокремлюються на всій території й загалом спостерігаються в постійній тенденції до підняття Карпат та опускання Закарпатського прогину. Для четвертинного періоду ця тенденція проявляється у формуванні переважно

цокольних терас, рівень яких прогресивно зростає від низовини до головного вододілу Карпат, та в утворенні потужних чопських і минайських відкладів у Закарпатському прогині (Максимчук та ін., 2005; Палиєнко, 1992).

Процеси підняття і опускання відносні й диференційовані за системою розривів загальнокарпатського простягання, які збігаються з межами блоків, скиб, лусок. Показник сумарних амплітуд неотектонічних рухів має змінні значення у різних структурно-фаціальних зонах. Найбільші показники фіксуються в межах Поркулецького покриву (до 1800–2000 м). Дуклянський покрив характеризується значеннями 1200–1600 м, Кросненська зона – 800–1200 м. Район досліджень належить до зони перервно-безперервних диференційованих підняття і горизонтальних рухів земної кори (з підзоною складчастобрілових рухів в умовах інтенсивного горизонтального стиснення і спряжених інтенсивних підняття), а також до зони коливальних (знакозмінних рухів з підзоною вулканотектонічних процесів і спряжених з ними рухів). Найактивніші неотектонічні підняття і горизонтальні рухи земної кори фіксуються в першій зоні. Середні градієнти швидкостей неотектонічних рухів у межах першої зони становлять $2 \cdot 10^{-4}$ – $7 \cdot 10^{-4}$ см/км/рік.

Сучасні вертикальні тектонічні рухи супроводжуються формуванням вузьких V-подібних долин гірських річок зі скелястим ложем, висячими долинами приток. Так, на території досліджень у притоках р. Пині спостерігаються чітко виражені терасоподібні уступи, що фіксують етапи тектонічної активізації. Рельєфні ознаки сучасних тектонічних підняття підтверджуються GPS-спостереженнями перманентних станцій Європейського блоку мережі ITRF (Міжнародна земна референтна система), за допомогою яких обчислено горизонтальні та вертикальні деформації земної поверхні (Кузьменко та ін., 2005). Швидкості вертикальних рухів у межах вивченої території сягають до +5 мм/рік. Таким чином, постійна активізація тектонічних рухів земної кори зумовлює формування потенційної енергії виникнення водних, гравітаційних і водно-гравітаційних процесів, що в поєднанні з літологічними та геоморфологічними факторами спричиняють посилення та інтенсифікацію зсувних, обвальних, осипних та ерозійних процесів. Додаткові дослідження вертикальних зміщень земної поверхні в межах локальних природних і техногенних об'єктів

забезпечуються застосуванням методів супутникової інтерферометрії, що дає можливість представлення кількісних показників цих параметрів у межах окремих ділянок і територій.

Аналіз вертикальних зміщень земної поверхні в межах Карпатського модельного полігону. Для досліджень вертикальних зміщень земної поверхні в межах Карпатського модельного полігону використано супутникові знімки Sentinel-1 за період з 26 вересня 2016 р. до 4 листопада 2018 р. Європейський супутник дистанційного зондування Землі Sentinel-1 забезпечує виконання програми глобального моніторингу навколишнього середовища і безпеки "Copernicus" (попередня назва GMES). На борту супутника встановлено радіолокаційну станцію (РЛС) із синтезованою апертурою C-SAR (розроблена компанією "Astrium"), яка забезпечує надходження космічних знімків за будь-якої погоди. Зйомка виконується в С-діапазоні (довжина хвилі 6 см). Після обробки даних в деяких режимах просторова роздільна здатність досягає 1 x 1 м. Група знімків Sentinel-1 хоч і має не найкраще розрізнення, але постійно перебуває у вільному доступі, знімки можна отримувати кожні шість днів.

Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні виконується в декілька етапів:

- **Підбір радіолокаційних даних, придатних для інтерферометрії.** На першому етапі проводиться формування каталогу знімків (щомісяця). Перевага надається знімкам у теплу пору року, оскільки в холодні місяці наявність снігу може спричинити чималу похибку. Виконується завантаження файлів орбіти для космознімків, імпорт і, за необхідності, фокусування голограм нульового рівня;

- **Виконання кореєстрації.** Для інтерферометричної обробки два або більше зображення (знімки) мають бути кореєстровані в стек. Виконується кореляція амплітуд знімків і кореєстрація за порогом когерентності;

- **Формування загальної інтерферограми.** Комбінація інтерференційних ліній являє собою повний цикл 2π . Кольорові окантовки з'являються на інтерферограмі як цикли довільних кольорів, причому кожен цикл становить половину довжини хвилі супутника. Чим ближче лінії одна до одної, тим більше зміщення відбулось у цьому районі. Для отримання інтерферограми використовуються спеціальні цифрові моделі рельєфу (SRTM і DEM);

- **Виділення топографічної фази.** При формуванні інтерферограми враховується фаза рельєфу території (SRTM). Для більш точного формування карти необхідно її видалити. Інтерферограма може бути трохи сплюснена шляхом видалення топографічної фази.

- **Фільтрація і розгортка фази.** Щоб мати можливість правильно розгортати фази, виконується фільтрація інтерферограми від фазових шумів. Перед розгортанням фази виділяється певна територія. Модуль реалізує розгортку фази шляхом видалення розривів, які перевищують значення в 2π ;

- **Формування карти деформацій.** Фінальний результат обробки, що являє собою карту вертикальних зміщень земної поверхні території дослідження (Углицьких та ін., 2016).

У результаті виконання зазначених операцій було побудовано загальну карту вертикальних зміщень земної поверхні Карпатського модельного полігону та виконано ранжування території на три зони згідно з показниками вертикальних зміщень земної поверхні (рис. 3). Зона 1 характеризується максимальними підняттями – 3–4 см за 2 роки. Ця зона розташована на півночі досліджуваної території в межах Свалявського району. Вона займає близько 10 % регіону. Зона 2 характеризується значеннями вертикальних зміщень 1–2 см за 2 роки. Вона займає близько 70 % території, включаючи в себе міста Мукачеве, Іршава, Межигір'я, Поляна і Голятин. Зона 3 займає 20 % досліджуваної території та включає в себе ділянки з опусканням території до 0,3–5,5 см за 2 роки (рис. 4). Тренд опускань є сталим, лише з невеликими сезонними підняттями, що, імовірно, є наслідком природних гідрометеорологічних явищ. Слід відзначити окремі локальні ділянки опускання поверхні, пов'язані з трасами трубопроводів. Таким чином, регіональна карта зміщень земної поверхні в межах Карпатського модельного полігону дає можливість зафіксувати диференційований характер сучасних деформацій. Однак найбільшу ефективність метод радарної інтерферометрії має при великомасштабних дослідженнях природно-техногенних систем та аналізі режиму і динаміки небезпечних геологічних процесів у межах окремих об'єктів.

Так, при аналізі зсувонебезпечної ділянки в межах с. Голубине виявлено таку динаміку зсувного процесу (рис. 4). З огляду на аналіз зсувонебезпечної ділянки можна констатувати, що вертикальне зміщення поверхні є сталим протягом трьох років, що спостерігається і на всій території Карпатського полігону, із середнім просіданням близько 2 см на рік. Зауважимо, якщо використовувати супутники з більшою роздільною здатністю, похибку досліджень можна звести до мінімуму й отримати більш точні результати.

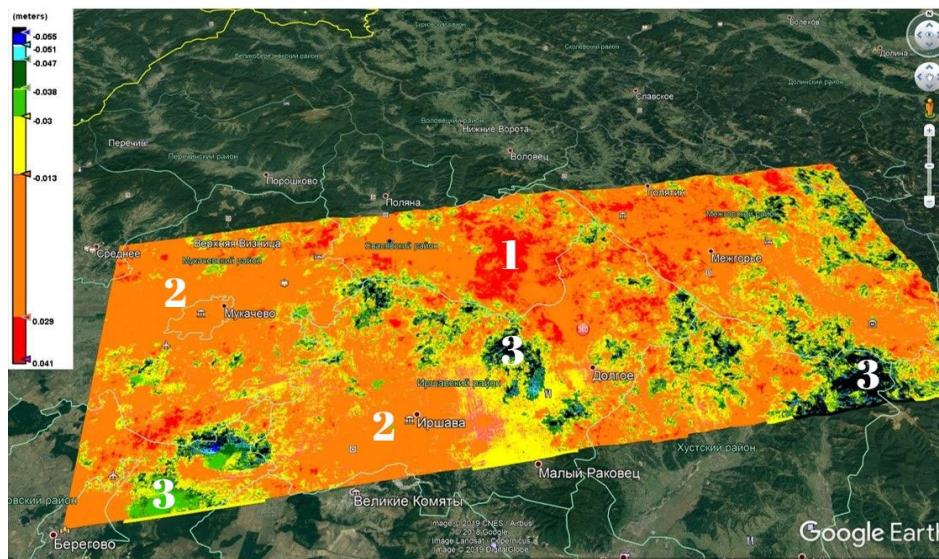


Рис. 3. Загальна карта деформацій земної поверхні території Закарпаття (позначення в тексті)



Рис. 4. Графік вертикальних зміщень зсувонебезпечної ділянки в межах с. Голубине (48°34'49.2"N 22°58'13.7"E)

Наслідком зсувних процесів є пошкодження будинків, господарських будівель і ґрунтової дороги в населеному пункті (рис. 5). Активізація зсуву відбулася в березні 2001 р., однак щорічний моніторинг стану зсувонебезпечного схилу фіксує значні зміни його морфології, зокрема формування нових тріщин відриву та зростання амплітуди вже існуючих (понад 30 см на рік). Морфологічно зсуви належать до складно побудованих, для них характерні нечітко виражені основні стінки відриву, що мають каскадний характер. Сформовано зсуви на схилах із крутизою від 30 до 35°. У верхній частині схилу в місцях розташування будинків і дороги спостерігаються видовжені уступи в рельєфі.



Рис. 5. Зсув у межах північно-східної околиці с. Голубине, Свалявський р-н Закарпатської обл. (долина струмка Гучало)

Ділянка дослідження розташована в межах Лисичевської підзони Поркулецької структурно-фаціальної зони. У численних ділянках струмка Гучало спостерігаються зони інтенсивного дроблення породних комплексів, що характеризуються неоднорідною будовою, наявністю численних різнопорядкових розривних порушень різного кінематичного типу. Проведені дослідження підтверджують наявність деструктивної зони, що характеризується тектонізованістю флішoidних товщ і наявністю слабкоцементованих відкладів, яка за умови надмірного зволоження є провідним чинником формування та активізації зсувів. Слід зазначити, що інтенсивна бічна ерозія р. Пиня посилює та інтенсифікує зсувні процеси і призводить до зміни загальних морфологічних ознак схилів, створюючи при цьому умови розвантаження схилу.

Висновки. Метод радарної інтерферометрії дозволяє здійснювати моніторинг зміщень земної поверхні в

режимі реального часу й оперативно отримувати актуальні дані. У результаті проведених досліджень Карпатського модельного полігону було опрацьовано 26 пар інтерферограм за період 2016–2018 рр. Визначено диференційовані значення деформації земної поверхні за цей період. Підтверджено, що використання даних інтерферометрії є ефективним для детального аналізу режиму та динаміки небезпечних геологічних процесів. Однією із сильних сторін використання супутникових інтерферометричних даних є можливість картування потенційних зсувів у гірських районах. Дані зйомки мають прикладну цінність і при хорошій розрізненості та відповідному алгоритмі обробки дають обґрунтовані результати. Оцінка динаміки розвитку зсувів у межах зсувонебезпечних територій за даними супутникової інтерферометрії в поєднанні з даними літолого-стратиграфічних, геоморфологічних і структурно-тектонічних досліджень дає надійні результати щодо прогнозування розвитку цих процесів і мінімізації їхнього негативного впливу на природно-техногенні системи.

Список використаних джерел

- Багрій, І.Д., Блінов, П.В., Гожик, П.Ф., Кожем'якін, В.П. (2004). Активізація небезпечних геологічних явищ у Закарпатті як наслідок екстремальних паводків. Київ: Інститут геологічних наук НАН України.
- Вялов, О.С., Андреева-Григорович, А.С., Гавура, С.П. и др. (1989). Региональная схема стратиграфии меловых отложений Украинских Карпат. *Палеонтологический сборник*, 26, 71–72.
- Демчишин, М.Г. (2004). Техногенні впливи на геологічне середовище території України. Київ: Гнозис.
- Іванюта, С.П., Яковлев, Є.О. (2014). Регіональна оцінка рівня техногенного навантаження в Україні. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 6, 38–45.
- Климчук, Л.М., Блінов, П.В., Величко, В.Ф. та ін. (2008). Сучасні інженерно-геологічні умови України як складова безпеки життєдіяльності. Київ: ВПЦ "Експрес".
- Кузьменко, Е.Д., Безсмертий, А.Ф., Вдовина, О.П. та ін. (2009). Дослідження зсувних процесів геофізичними методами. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ.
- Максимчук, В.Ю., Кузнецова, В.Г., Вербицький, Т.З. та ін. (2005). Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. Київ: Наук. думка.
- Палиєнко, В.П. (1992). Новейшая геодинамика и ее отражение в рельефе Украины. Киев: Наук. дума.
- Рудько, Г.И., Осипук, В.А. (2012). Инженерная геодинамика Украины и Молдовы (оползневые геосистемы). Черновцы: Букрек.
- Углицьких, Е.К., Зацерковный, В.И., Тишаев, И.В. (2016). Мониторинг деформаций вулканических структур на основе дистанционных зондирований Земли. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 13, 4–8.
- Ashkenas, H.I. (1950). The design and construction of a Mach-Zehnder interferometer for use with the GALCIT Transonic Wind Tunnel. *Engineer's thesis. California Institute of Technology*, 121–122.
- Bawden, G.W., Stein, R.S., Hudnut, K.W. (2001). Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects. *Nature*, 412, 812–815.
- Breining, G. (2007). Super Volcano: The Ticking Time Bomb beneath Yellowstone National Park. St. Paul, Minnesota: Voyageur Press: ISBN 978-0-7603-2925-2.
- Chevalerias, R., Latron, Y., Veret, C. (1957). Methods of Interferometry Applied to the Visualization of Flows in Wind Tunnels. *Journal of the Optical Society of America*, 47 (8), 703. doi:10.1364/JOSA.47.000703.
- Hanssen, R.F. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Netherlands: Kluwer Academic Publishers: ISBN 9780792369455.

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517, 1–13.

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.

Lu, Zh., Wright, T., Wicks, Ch. Jr. (2003). Deformation of the 2002 Denali fault earthquakes, mapped by RadarSat-1 interferometry. *Eos*, 41, 425–431.

Massonnet, D., Feigl, K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36 (4), 441–500.

Monnier, J.D. (2003). Optical interferometry in astronomy. *Reports on Progress in Physics*, 66 (5), 789–857.

Paschotta, R. (2012). Optical Heterodyne Detection. *RP Photonics Consulting GmbH*, 40, 243–250.

Rucci, A., Ferretti, A., Guarnieri, A.M., Rocca, F. (2012). Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing of Environment*, 120, 156–163.

References

Ashkenas, H.I. (1950). The design and construction of a Mach-Zehnder interferometer for use with the GALTIT Transonic Wind Tunnel. *Engineer's thesis. California Institute of Technology*, 121–122.

Bawden, G.W., Stein, R.S., Hudnut, K.W. (2001). Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects. *Nature*, 412, 812–815.

Bahri, I.D., Blinov, P.V., Hozhyk, P.F., Kozhemiakin, V.P. (2004). Aktyvizatsiia nebezpechnykh heolohichnykh yavysch u Zakarpatti yak naslidok ekstremalnykh pavodkiv. Kyiv: Instytut heolohichnykh nauk NAN Ukrainy. [In Ukrainian]

Breining, G. (2007). Super Volcano: The Ticking Time Bomb beneath Yellowstone National Park. St. Paul, Minnesota: Voyageur Press: ISBN 978-0-7603-2925-2.

Chevalerias, R., Latron, Y., Veret, C. (1957). Methods of Interferometry Applied to the Visualization of Flows in Wind Tunnels. *Journal of the Optical Society of America*, 47 (8), 703. doi:10.1364/JOSA.47.000703.

Demchyshyn, M.H. (2004). Tekhnohenni vplyvy na heolohichne seredovyshe terytorii Ukrainy. Kyiv: Hnozis. [In Ukrainian]

Hanssen, R.F. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Netherlands: Kluwer Academic Publishers: ISBN 9780792369455.

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517, 1–13.

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.

Ivaniuta, S.P., Yakovliev, Ye.O. (2014). Rehionalna otsinka rivnia tekhnohennoho navantazhennia v Ukraini. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*, 6, 38–45. [In Ukrainian]

Klymchuk, L.M., Blinov, P.V., Velychko, V.F. et al. (2008). Suchasni inzhenerno-heolohichni umovy Ukrainy yak skladova bezpeky zhyttiedialnosti. Kyiv: VPTs "Ekspres". [In Ukrainian]

Kuzmenko, E.D., Bezsmerti, A.F., Vdovyna O.P. et al. (2009). Doslidzhennia zsvnykh protsesiv heofizychnymy metodamy. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH. [In Ukrainian]

Lu, Zh., Wright, T., Wicks, Ch. Jr. (2003). Deformation of the 2002 Denali fault earthquakes, mapped by RadarSat-1 interferometry. *Eos*, 41, 425–431.

Maksymchuk, V.Yu., Kuznietsova, V.H., Verbytskyi, T.Z. et al. (2005). Doslidzhennia suchasnoi heodynamiky Ukrainykyh Karpat. Kyiv: Naukova dumka. [In Ukrainian]

Massonnet, D., Feigl, K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36 (4), 441–500.

Monnier, J.D. (2003). Optical interferometry in astronomy. *Reports on Progress in Physics*, 66 (5), 789–857.

Palyenko, V. P. (1992). Noveishaia heodynamika y ee otrazhenie v relefe Ukrainy. Kyiv: Naukova dumka. [In Russian]

Paschotta, R. (2012). Optical Heterodyne Detection. *RP Photonics Consulting GmbH*, 40, 243–250.

Rucci, A., Ferretti, A., Guarnieri, A.M., Rocca, F. (2012). Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing of Environment*, 120, 156–163.

Rudko, H.Y., Osiuk, V.A. (2012). Ynzhenernaia heodynamika Ukrainy y Moldovi (opolznevie heosystemi). Chernovtsi: Bukrek. [In Russian]

Uhlytskykh, Ye.K., Zatserkovnyii, V.I., Tishaiev, I.V. (2016). Monitorynh deformatsii vulkanichnykh struktur na osnovi dystantsiinykh zonduvan Zemli. *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky*, 13, 4–8. [In Ukrainian]

Vialov, O.S., Andreeva-Hryhorovych, A.S., Havura, S.P. et al. (1989). Rehionalnaia skhema stratyhrafy melovykh otlozheniy Ukrainykyh Karpat. *Paleontologicheskyy sbornik*, 26, 71–72. [In Russian]

Надійшла до редколегії 05.03.2020

E. Uglitskih, PhD Student,

E-mail: evgeniyuglitskih1993@gmail.com;

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

E-mail: vyzhvas@gmail.com;

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

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

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

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

VERTICAL DISPLACEMENT MONITORING OF ZAKARPATTYA REGION TERRITORY BASED ON RADAR INTERFEROMETRY DATA

The article presents result of deformation monitoring in Zakarpattia region, performed using the method of radar interferometry. The method of radar interferometry allows to monitor the displacements of the earth's surface in real time and quickly obtain up-to-date data. As a result of the research of the Carpathian model landfill, 26 pairs of interferograms for the period 2016–2018 were processed. As a result of these operations, a general map of vertical displacements of the earth's surface of the Carpathian model landfill was constructed. The territory is ranked into 3 zones according to the indicators of vertical displacements of the earth's surface. It is confirmed that the use of interferometry data is effective for detailed analysis of the regime and dynamics of dangerous geological processes. These surveys are of great value and with good resolution and appropriate processing algorithm give reasonable results and conclusions, which in combination with lithological-stratigraphic, geomorphological and structural-tectonic studies can be used to predict dangerous geological processes and minimize their negative impact on nature and man-made systems.

Keywords: remote sensing, interferometry, displacement of the earth's surface, dangerous geological processes.

Е. Углицких, асп.,

E-mail: evgeniyuglitskih1993@gmail.com;

С. Выжва, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: vyzhvas@gmail.com;

Е. Иваник, д-р геол. наук, проф.,

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

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

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

МОНИТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ ЗАКАРПАТТЯ ПО ДАННЫМ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Представлены результаты мониторинга деформаций земной поверхности территории Закарпатья, выполненного с помощью метода радарной интерферометрии. Метод радарной интерферометрии позволяет осуществлять мониторинг смещений земной поверхности в режиме реального времени и оперативно получать актуальные данные. В результате проведенных исследований Карпатского модельного полигона были обработаны 26 пар интерферограмм за период 2016–2018 гг. и построена общая карта вертикальных смещений земной поверхности Карпатского модельного полигона. Выполнено ранжирование территории на три зоны согласно показателям вертикальных смещений земной поверхности. Подтверждено, что использование данных интерферометрии является эффективным для детального анализа режима и динамики опасных геологических процессов, в частности оползней. Данные съемки имеют прикладную ценность и при хорошей разрозненности и соответствующем алгоритме обработки дают обоснованные результаты, которые в сочетании с данными литолого-стратиграфических, геоморфологических и структурно-тектонических исследований могут быть использованы для прогнозирования опасных геологических процессов и минимизации их негативного влияния на природно-техногенные системы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, интерферометрия, смещение земной поверхности, опасные геологические процессы.

УДК 556.3 (528.944)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.14>

О. Остроух, канд. геол. наук,
E-mail: ostro-oks@ukr.net,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Коледж геологорозвідувальних технологій,
вул. В. Тютюнника, 9, м. Київ, 03680, Україна;
Д. Чомко, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: dimath@ukr.net,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
В. Остроух, канд. геогр. наук, доц.,
E-mail: os-vit@ukr.net,
ORCID ID 0000-0003-4097-1736;
І. Підлісецька, канд. геогр. наук, доц.,
E-mail: irinna2008@ukr.net,
ORCID ID 0000-0001-6724-2379;
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
географічний ф-т, пр. Акад. Глушкова, 2, а, м. Київ, 03127, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ І МОЖЛИВОСТЕЙ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ҐРУНТОВИХ ВОД

(Представлено членами редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим і д-ром техн. наук, проф. В.І. Зацерковним)

Викладено результати дослідження еколого-гідрогеохімічного стану ґрунтових вод Чоп-Мукачівського басейну і виявлення просторово-часових змін їхнього хімічного складу за допомогою засобів ГІС. Удосконалено методику обробки вихідних гідрогеологічних даних на базі геоінформаційних технологій та апробовано її на прикладі просторово-часових змін показників хімічного складу. Створена спеціалізована геоінформаційна база даних хімічного складу ґрунтових вод. За результатами оцінки просторово-часових закономірностей змін хімічного складу із застосуванням статистичного аналізу, картографічного моделювання та просторового аналізу в ГІС встановлено райони з підвищеною мінералізацією та жорсткістю ґрунтових вод. На основі комплексного підходу виконано районування та проведено оцінку сучасного гідрогеохімічного стану ресурсів ґрунтових вод території дослідження.

Ключові слова: геоінформаційні методи, моделювання, просторово-часові зміни, Чоп-Мукачівський басейн, ґрунтові води, хімічний склад, моніторинг, база даних, захищеність.

Постановка проблеми. Основні резерви прісних підземних вод Закарпатської області зосереджені в ґрунтовому водоносному горизонті, приуроченому до алювіальних відкладів минайського віку, які займають близько 80 % території Чоп-Мукачівської западини. Ґрунтові води експлуатуються численними водозаборами та свердловинами і широко використовуються для питного водопостачання населення, промислових і сільськогосподарських підприємств. Видобуток значних обсягів води сприяє не лише зміні гідрогеологічних характеристик ґрунтового водоносного горизонту, а й призводить до зміни хімічного складу води. В умовах інтенсивного антропогенного навантаження та дефіциту чистих питних вод набуває великого значення проблема оцінки еколого-гідрогеохімічного стану ґрунтових вод і виявлення його просторово-часових змін.

Основою такої оцінки є: вивчення з використанням геоінформаційних технологій загальних гідрогеохімічних особливостей ґрунтових вод, встановлення закономірностей формування їхнього хімічного складу і дослідження захищеності від забруднення. Ураховуючи тенденції розвитку сучасних інформаційних технологій, вирішувати поставлені завдання необхідно з використанням геоінформаційного підходу, який полягає в застосуванні геоінформаційних систем (ГІС).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінці просторово-часових закономірностей змін хімічного складу ґрунтових вод різних регіонів із застосуванням статистичного аналізу, картографічного моделювання та просторового аналізу в ГІС присвячено праці (Огняник, 1985; Почтаренко та ін., 2002; Чомко, 2009). Методику обробки вихідних гідрогеологічних даних на базі геоінформаційних технологій висвітлено в роботах таких авторів (Рубан та Шинкаревський, 2005; Кошляков, 2010).

Вивченням регіональних закономірностей формування хімічного складу ґрунтових вод їхніх гідрогеологічних умов у різний час займалися (Радько, 1975; Остроух, 2011).

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Слід зазначити, що дослідження змін хімічного складу ґрунтових вод Чоп-Мукачівського басейну проводилися на локальних ділянках або на окремих водозабірних спорудах за відносно короткий проміжок часу. Такі дослідження не давали змоги отримати цілісну картину змін хімічного складу ґрунтових вод як за площею, так і в часі. У сучасних умовах існує нагальна потреба в комплексному підході до оцінки стану ресурсів і хімічного складу ґрунтових вод басейну, використовуючи геоінформаційні технології. Вирішенню поставленого завдання присвячено дану статтю.

Формулювання цілей статті. Метою статті є кількісна оцінка просторово-часових закономірностей змін хімічного складу ґрунтових вод Чоп-Мукачівського басейну за багаторічний період експлуатації на основі геоінформаційного аналізу і моделювання в ГІС. Для досягнення цієї мети необхідно вдосконалити методику обробки вихідних гідрогеологічних даних на базі геоінформаційних технологій та виконати якісну оцінку природної захищеності ґрунтового водоносного горизонту від забруднення.

Викладення основного матеріалу дослідження. Територія досліджень розташована в Чоп-Мукачівській западині Закарпатської області України, до якої приурочений однойменний басейн підземних вод. Гідрографія визначається головними водотоками Закарпатського регіону – річками Тиса, Латориця, Уж, Боржава.

Прісні підземні води на доступній глибині, мають добру якість і зосереджені в основному в алювіальному водоносному горизонті минайського віку. Алювіальні відклади представлені відсортованими піщано-галечними породами і крупнозернистим піском, у деяких місцях вони чергуються із суглинками та глинами. Товщина водоносного горизонту змінюється від 1–2 до 300 м. Води горизонту безнапірні й слабконапірні. За хімічним складом вони гідрокарбонатні кальцієві, кальцієво-магнієві,

кальцієво-натрієві й майже завжди з домішками хлоридів і сульфатів. Живлення водоносного горизонту здійснюється за рахунок інфільтрації атмосферних опадів і талих вод, річкових вод у період повені, а також їхньої інфільтрації з Вигорлат-Гутинського гірського пасма. Розвантаження підземного потоку здійснюється в р. Тиса та її притоки. У межах відгалуження Вигорлат-Гутинського гідрогеологічного вулканогенного масиву ґрунтовий водоносний горизонт розповсюджений епізодично.

Вихідною інформацією для цього дослідження стали результати хімічного аналізу проб води (починаючи із 1960 р.) централізованих, окремих водозаборів та одиночних свердловин, які експлуатують ґрунтовий водоносний горизонт. Найбільш повний ряд спостережень за хімічним складом ґрунтових вод відображений 1965 р. (118 аналізів) і за 2010 р. (87 аналізів). В останні роки в Чоп-Мукачівському басейні планових моніторингових досліджень хімічного складу ґрунтових вод не проводилося. У 2012–2015 рр. є інформація про хімічний склад

ґрунтових вод 14 свердловин, які розташовані на приватних ділянках.

Експериментально-практичні дослідження, що ґрунтувалися на ліцензованому програмному забезпеченні ArcGIS, дозволили здійснити вибір картографічної проєкції та провести геокодування даних хімічного складу ґрунтових вод.

На основі вихідних даних авторами сформовано спеціалізовану геоінформаційну базу даних хімічного складу ґрунтових вод.

Необхідно зазначити, що картографічною основою дослідження є цифрова карта Закарпатської області масштабу 1 : 200 000, складовими елементами якої є: адміністративні межі; об'єкти гідрографії; населені пункти; мережа автошляхів і залізниць; рельєф (горизонталі та абсолютні відмітки). На рис. 1. представлена функціональна модель бази даних, головними блоками якої є топографічне навантаження та спеціальний зміст.



Рис. 1. Функціональна модель спеціалізованої бази даних хімічного складу ґрунтових вод

Для виявлення тенденцій зміни хімічного складу ґрунтових вод у часі на основі одномірного статистичного аналізу визначався закон щільності розподілу. Аналіз кореляційної матриці свідчить про те, що станом на 1965 р. між мінералізацією, жорсткістю і хлоридами виявлено досить значимий за тіснотою прямий зв'язок (коефіцієнти кореляції становлять від 0,61 до 0,87). Дещо слабшим є зв'язок між жорсткістю і хлоридами ($r = 0,48$). Таким чином, при збільшенні жорсткості та іонів хлору у воді закономірно підвищується її мінералізація. Водночас не було виявлено значимих за щільністю кореляційних зв'язків між зазначеними вище компонентами на період 2010 р. (r від 0,19 до 0,40), що, імовірно, пояснюється впливом інших компонентів хімічного складу, які не аналізувалися.

Методом зворотних зважених відстаней (33В чи IDW) було змодельовано растрові й векторні поверхні поля мінералізації та інших елементів хімічного складу ґрунтових вод станом на 2010 р. У процесі моделювання виконано також перевірку достовірності отриманих результатів, яка показала, що отримані результати моделювання досить точно відображають фактичні значення показників, що досліджувалися.

Методами картографічного моделювання та просторового аналізу виявлені просторово-часові закономірності зміни мінералізації і компонентів хімічного складу ґрунтових вод за багаторічний період експлуатації. Для оцінки зміни показників мінералізації, жорсткості та вмісту хлоридів ґрунтових вод побудовано серію карт станом на 1965 та 2010 рр.

У результаті проведення оверлейного аналізу з використанням автоматизованого методу математичного накладання (різниця поверхонь) побудовано відповідні

карти величин мінералізації, жорсткості та вмісту хлоридів за період із 1965 по 2010 рр. Для прикладу, на рис. 2 наводиться карта зміни значень мінералізації ґрунтових вод за цей період.

При детальному аналізі карт були виділені ділянки ґрунтового водоносного горизонту без помітних змін та зі значними змінами хімічного складу вод.

З використанням засобів геоінформаційних технологій вивчалися умови формування хімічного складу. Аналіз побудованої поверхні змін величини мінералізації (рис. 2) показує, що майже на всій території досліджень відбулося підвищення мінералізації (95 % від загальної території дослідження), обумовлене як природними геологічними процесами, так і антропогенним навантаженням, а іноді – тими та іншим разом. Так, у зоні впливу водозабору для господарсько-питного водопостачання м. Ужгород фіксується збільшення мінералізації на 200–300 мг/дм³ за рахунок можливого підтягування мінералізованих вод із чопського водоносного горизонту при відборі об'єму води, що перевищує затверджену. Антропогенне походження скоріш за все має підвищення мінералізації на 250–400 мг/дм³ у межах промислових зон міст Мукачеве, Берегове, Виноградів, що в більшості випадків пов'язане із сільськогосподарською і господарсько-побутовою діяльністю. У межах центральної частини території (сmt. Батьово, м. Чоп) тенденція зміни мінералізації пояснюється функціонуванням об'єктів транспортної інфраструктури – пунктів миття вагонів на станціях, які негативно впливають на якість ґрунтових вод. На незначних локальних площах північно-східної та південної частини території дослідження збільшення мінералізації не відбулося або вона навіть трохи зменшилась.

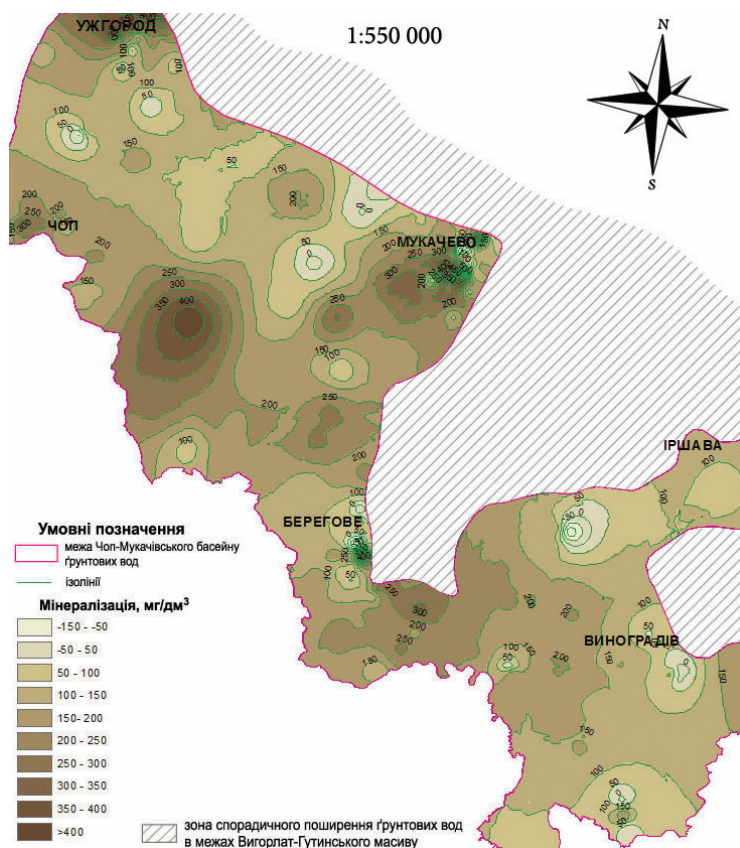


Рис. 2. Карта зміни значень мінералізації ґрунтових вод

Очевидним є те, що ділянки з підвищеною мінералізацією просторово збігаються з ділянками, які характеризуються високою жорсткістю та завищеним вмістом хлорид-іонів. Вони зустрічаються на 40 % території досліджень і розповсюджені локально в містах Ужгород, Мукачеве, Чоп, Берегове, що свідчить про перманентне антропогенне забруднення ґрунтового водоносного горизонту.

Крім того, ділянки підвищеного вмісту хлору формуються також під впливом і природних геологічних чинників, що приурочені до диз'юнктивних порушень і особливо до вузлів перетину поперечних і поздовжніх розломів – Мукачівського, Чопського, Берегівського, де по ослаблених тектонічних зонах відбувається розвантаження мінералізованих вод у водоносні горизонти верхньої гідродинамічної зони.

Інтенсивність антропогенного впливу на ґрунтові води багато в чому визначається ступенем їхньої захищеності. Захищеність залежить від природних і антропогенних факторів. До основних природних належать: глибина залягання підземних вод, наявність у розрізі й товщина водотривких порід, наявність гідрогеологічних вікон, літологія і сорбційні властивості порід, співвідношення рівня ґрунтового і напірних водоносних горизонтів. До антропогенних факторів слід віднести наявність та умови знаходження забруднювальних речовин на поверхні землі, швидкість їхнього проникнення у підземні води, хімічний склад забруднювальних речовин і, як наслідок, їхню міграційну здатність, хімічну стійкість, характер взаємодії з породами і підземними водами.

В основі якісної оцінки природної захищеності ґрунтових вод лежить визначення суми умовних балів, обумовлених природними факторами. За сумою балів виділяють категорії захищеності: захищені, умовно захищені та незахищені ґрунтові води.

У зв'язку з цим подальшого розвитку набула методика якісної оцінки умов природної захищеності ґрунтових вод В.М. Гольдберга (Гольдберг, 1987) шляхом комплексного застосування літологічних і гідродинамічних характеристик геологічного середовища. Побудовано растрову цифрову модель рельєфу (спочатку на основі шару ізоліній рельєфу, за допомогою модуля 3D Analyst створена векторна модель рельєфу, після чого векторна модель конвертована в растрову). На основі даних про глибину залягання підземних вод, що були занесені до спеціалізованої бази даних (по 87 свердловинам станом на 2010 р.) побудовано растрову модель глибини залягання ґрунтових вод (*idw_rgv*). У подальшому, використовуючи дані про потужність шару слабопроникних відкладів, виконана побудова растрової моделі потужності шару слабопроникних відкладів (*idw_pot*). З метою визначення сумарної бальної оцінки природної захищеності ґрунтового водоносного горизонту алювіальних відкладів в ArcGIS за допомогою функції Spatial Analyst → Map Algebra → Raster Calculator реалізовано математичне накладання двох растрових шарів (*idw_rgv* + *idw_pot*), на основі чого здійснено ранжування досліджуваної території.

Результатом є створена карта просторової диференціації ґрунтового водоносного горизонту за сумарною бальною оцінкою природної захищеності. Застосовуючи цю модернізовану методику за допомогою засобів геoinформаційних технологій, побудовано растрові шари глибини залягання ґрунтових вод і товщини шару слабопроникних відкладів. З метою визначення сумарної бальної оцінки природної захищеності ґрунтових вод в ArcGIS створено карту просторової диференціації ґрунтового водоносного горизонту за сумарною бальною оцінкою природної захищеності. Незахищені ґрунтові води показані світло-зеленим кольором, а умовно захищені – темно-зеленим і зеленим (рис. 3).

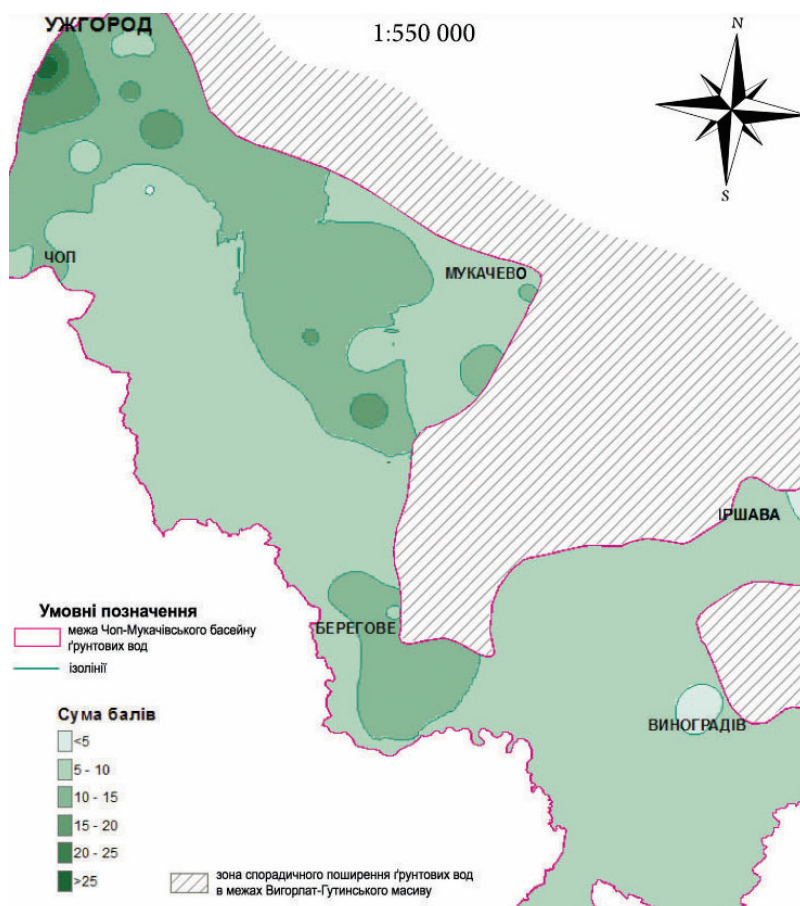


Рис. 3. Карта просторової диференціації ґрунтового водоносного горизонту за сумарною бальною оцінкою природної захищеності

Спільне врахування літологічних і гідродинамічних характеристик дозволяє виділити дві категорії захищеності ґрунтового водоносного горизонту – незахищені, яким за сумою балів відповідає градація від 5 до 20 (71 % площі розповсюдження ґрунтових вод), та умовно захищені з градацією від 20 і більше (29 %). Незахищені ґрунтові води залягають в південно-східній та західній частині Чоп-Мукачівського басейну, умовно захищені – у північній частині.

Урахування умов захищеності та виділення категорій мінералізації й жорсткості (Алекин, 1970) ґрунтових вод дозволило створити карти літолого-гідрогеохімічного стану ґрунтових вод на 1965 р. та 2010 р. (рис. 4 а, б).

Так, південно-східна та західна частини території, які належить до незахищених, характеризуються зміною як мінералізації, так і жорсткості води. Води змінилися з ультрапрісних м'яких на прісні із помірно жорсткістю або із прісних помірно жорстких – на води жорсткі із підвищеною мінералізацією.

Причини такої зміни пояснюються тим, що ділянки з незахищеними водами залягають в заплавах рік Тиса, Латориця, Боржава, де верхній водотривкий шар відсутній або ж складений глинами, суглинками невеликої товщини. На заплавах цих рік ґрунтові води мають тісний гідралічний зв'язок з поверхневими. За наявності поверхневого джерела забруднення внаслідок перетоків тут збільшується імовірність погіршення їхньої якості.

Крім того, наявність численних меліоративних каналів у західній частині території призвело до зниження захисних властивостей слабопроникних порід, що значно порушило природну захищеність ґрунтових вод.

Суттєві відхилення у зміні хімічного складу, що зафіксовані поблизу локальних ділянок приміських територій

(міст Мукачево, Берегове, Ужгород), де води ґрунтового водоносного горизонту змінилися з ультрапрісних м'яких або з помірно жорстких на води жорсткі з підвищеною мінералізацією, є підтвердженням негативного впливу антропогенного навантаження. Цьому також сприяє як активна експлуатація їх централізованими водозаборами в межах перелічених ділянок, так і наявність численних джерел забруднення.

У північній частині ділянки дослідження, де водотрив витриманий за товщиною, відсутні гідрогеологічні вікна, води класифікуються як умовно-захищені. Кардинальних змін мінералізації та жорсткості води не сталося.

Використовуючи карти зміни гідрогеохімічної обстановки та карту просторової диференціації ґрунтового водоносного горизонту за сумарною бальною оцінкою природної захищеності за результатами багатолітніх досліджень на основі комплексного підходу виконано районування території Чоп-Мукачівського басейну (рис. 5).

За результатами цього аналізу вдалося виділити:

1. Ділянки без помітних відхилень хімічного складу води. Сюди входять площі з позитивними змінами хімічного складу (ваговий коефіцієнт дорівнює 1) та площі, де змін хімічного складу не відбулося (ваговий коефіцієнт дорівнює 0).

2. Ділянки зі значними змінами хімічного складу, куди входять площі з негативними змінами хімічного складу (ваговий коефіцієнт дорівнює –1).

3. За допомогою засобів геоінформаційних технологій встановлено, що до умовно-захищених ділянок приурочені ґрунтові води без помітних відхилень, а до ділянок із слабкою природною захищеністю – ґрунтові води із значними змінами хімічного складу.

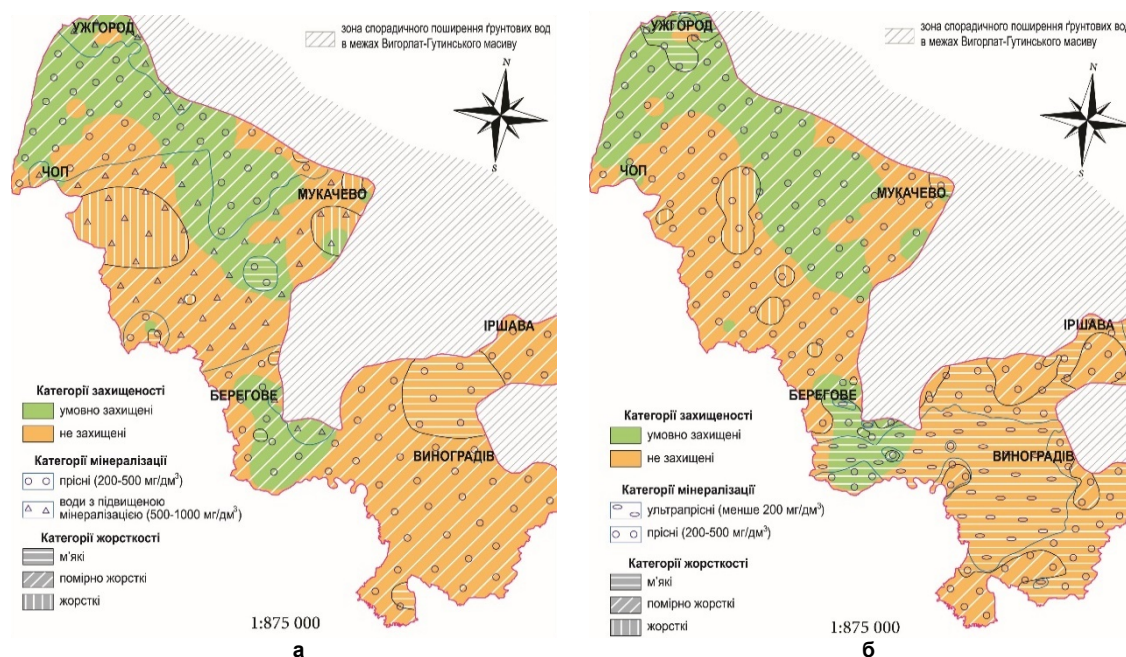


Рис. 4. Карти літолого-гідрогеохімічного стану ґрунтових вод:
а – 1965 р.; б – 2010 р.

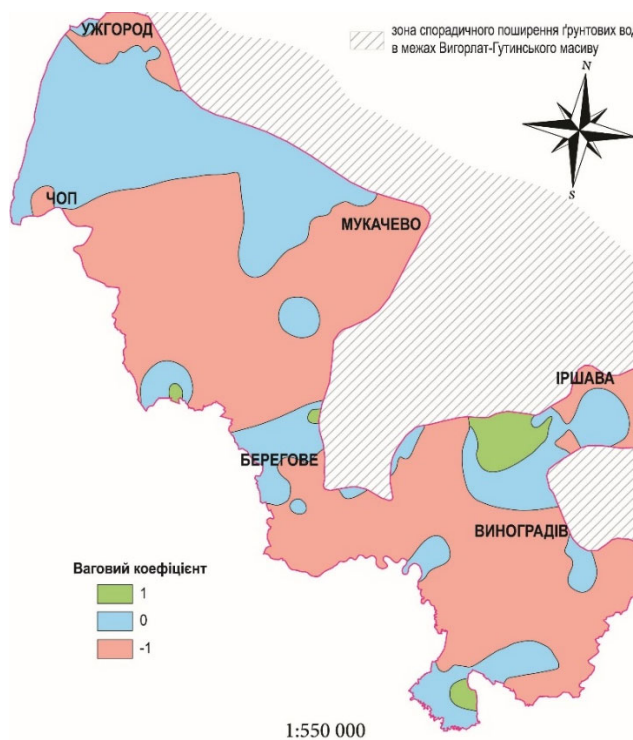


Рис. 5. Карта динаміки гідрогеохімічної обстановки ґрунтових вод за період з 1965 по 2010 рр.

Висновки. Використання геоінформаційних технологій дозволило простежити кількісні зміни хімічного складу ґрунтових вод у часі й просторі. Створення карт різниці величини мінералізації, жорсткості й вмісту хлоридів та ін. дало змогу з'ясувати, що майже на всій території дослідження (95 % від загальної площі) відбулося підвищення мінералізації, на половині території зросла жорсткість води, підвищився вміст хлоридів та ін. Імовірними причинами забруднення ґрунтових вод є антропогенні фактори (інтенсивний водовідбір, сільськогосподарська діяльність, функціонування об'єктів транспортної інфраструктури).

За вдосконаленою методикою В.М. Гольдберга виконано просторову оцінку природних умов захищеності ґрунтового водоносного горизонту Чоп-Мукачівського

басейну. Виділено дві категорії захищеності ґрунтових вод – незахищені (71 % площі розповсюдження цього горизонту) та умовно захищені (29 %). Установлено, що південно-східна та західна частина Чоп-Мукачівського басейну належить до незахищених, а в північній частині – ґрунтові води картується як умовно-захищені. За допомогою засобів геоінформаційних технологій встановлено, що до умовно-захищених ділянок приурочені ґрунтові води без помітних змін, а до незахищених ділянок – ґрунтові води зі значними змінами хімічного складу.

В умовах збільшення антропогенного навантаження з метою недопущення погіршення сучасного гідрогеохімічного стану ґрунтових вод Чоп-Мукачівського басейну вважається за доцільне рекомендувати підвищити контроль

за режимом водовідбору ґрунтових вод і за їхніми хімічними показниками. Обов'язковим є проведення заходів з мінімізації впливу джерел забруднення (міські водозабори, станційні пункти миття вагонів, промислові відходи та господарсько-побутові стоки) на ґрунтові води. При визначенні пріоритетів проведення моніторингу підземних вод ключову роль має відігравати категоризація території за ступенем захищеності ґрунтових вод.

Список використаних джерел

- Алекин, О.А. (1970). Основы гидрохимии. Гидрометеиздат.
 Гольдберг, В.М. (1987). Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Гидрометеиздат.
 Кошляков, О. Кошлякова, Т. (2010). Геоинформационная база данных химического состава питных подземных вод для территории м. Киева. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 51, 36–38.
 Огняник, Н.С. (1985). Охрана подземных вод в условиях техногенеза. Вища школа.
 Остроух, О. (2011). Вивченість та сучасний стан використання підземних вод Закарпатської області. *Вісник Харківського національного університету. Геологія-Географія-Екологія*, 986, 56–61.
 Остроух, О. (2012). Природні та антропогенні чинники зміни хімічного складу підземних вод на території південно-західної частини Закарпатської області. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 57, 67–69.
 Почтаренко, В., Саніна, І., Люта, Н. (2002). Оцінка екологічного стану геологічного середовища із застосуванням ГІС-технологій. *Геоінформатика*, 1, 20–33.
 Радько, Н.І. (1975). Підземні води Закарпатського внутрішнього прогину. К.: Наук. думка.
 Рубан, С.А., Шинкаревський, М.А. (2005). Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України. К.: УкрДГРІ.

Чомко, Д., Остроух, О. (2009). Сучасний стан та проблеми використання ГІС-технологій в геологічних дослідженнях. *Вісник Харківського національного університету. Геологія-Географія-Екологія*, 882, 99–102.

References

- Alekin, O.A. (1970). Fundamentals of hydrochemistry. Hydrometeizdat. [in Russian]
 Chomko, D., Ostrokh, O. (2009). Current state and problems of using GIS-technologies in geological research. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Geology-Geography-Ecology*, 882, 99–102. [in Ukrainian]
 Goldberg, V.M. (1987). The relationship of groundwater pollution and the environment. Hydrometeizdat. [in Russian]
 Koshliakov, O. Koshliakova, T. (2010). Geoinformation database of the chemical warehouse of fresh water for the territory of metro station Kyiv. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 51, 36–38. [in Ukrainian]
 Ognianik, N.S. (1985). Groundwater protection under technogenesis. High school. [in Ukrainian]
 Ostrokh, O. (2011). Studied and current state of the use of groundwater in the Transcarpathian region. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Geology-Geography-Ecology*, 986, 56–61. [in Ukrainian]
 Ostrokh, O. (2012). Natural and anthropogenic factors changing the chemical composition of groundwater in the southwestern part of Transcarpathian region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 57, 67–69. [in Ukrainian]
 Pochtarenko, V., Sanina, I., Liuta, N. (2002). Assessment of the ecological status of the geological environment using GIS technologies. *Geoinformatics*, 1, 20–33. [in Ukrainian]
 Radko, N.I. (1975). Groundwater of Transcarpathian internal deflection. K.: Nauk. dumka. [in Ukrainian]
 Ruban, S.A., Shinkarevsky, M.A. (2005). Hydrogeological estimations and forecasts of the groundwater regime of Ukraine. K.: UkrDGRI. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 21.05.2020

O. Ostrokh, Cand. Sci. (Geol.),
 E-mail: ostro-oks@ukr.net;
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geological Exploring College,
 9 V. Tiutiunnyk Str., Kyiv, 03680, Ukraine;
 D. Chomko, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,
 E-mail: dimath@ukr.net;
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
 V. Ostrokh, Cand. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof.,
 E-mail: os-vit@ukr.net;
 I. Pidlisetska, Cand. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof.,
 E-mail: irinna2008@ukr.net;
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Geography,
 2a Ac. Glushkova Ave., Kyiv, 03127, Ukraine

USE OF SPATIAL ANALYSIS TOOLS AND CAPABILITY OF GEOINFORMATION SYSTEMS FOR ASSESSMENT OF THE STATE OF UNDERGROUND WATERS

The results of the study of the ecological-hydrogeochemical state of the underground waters of the Chop-Mukachevo basin and the identification of its spatio-temporal changes in the chemical composition using GIS facilities are presented. The methodology for processing the initial hydrogeological data on the basis of geographic information technologies has been improved and tested on the example of spatio-temporal changes in the indicators of chemical composition. A specialized geoinformation database of the chemical composition of groundwater has been created. The evaluation of spatio-temporal patterns of changes in the chemical composition using statistical analysis, cartographic modeling, and spatial analysis in GIS, identified areas with increased salinity and hardness of groundwater. Based on an integrated approach, zoning was performed and the current hydrogeochemical state of the groundwater resources of the study area was evaluated.

Keywords: geoinformation methods, modeling, spatio-temporal changes, Chop-Mukachevo basin, groundwater, chemical composition, monitoring, database, security.

O. Остроух, канд. геол. наук,
 E-mail: ostro-oks@ukr.net;
 Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
 Колледж геологоразведочных технологий, ул. В. Тютюнника, 9, г. Киев, 03680, Украина;
 Д. Чомко, канд. геол. наук, доц.,
 E-mail: dimath@ukr.net;
 Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
 УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, г. Киев, 03022, Украина;
 В. Остроух, канд. геогр. наук, доц.,
 E-mail: os-vit@ukr.net;
 И. Подлесекая, канд. геогр. наук, доц.,
 E-mail: irinna2008@ukr.net;
 Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
 географический ф-т, пр. Акад. Глушкова, 2, а, г. Киев, 03127, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Изложены результаты исследования эколого-гидрогеохимического состояния грунтовых вод Чоп-Мукачевского бассейна и выявления пространственно-временных изменений их химического состава с помощью средств ГИС. Усовершенствована методика обработки исходных гидрогеологических данных на базе геоинформационных технологий и апробирована на примере пространственно-временных изменений показателей химического состава. Создана специализированная геоинформационная база данных химического состава грунтовых вод. По результатам оценки пространственно-временных закономерностей изменений химического состава с применением статистического анализа, картографического моделирования и пространственного анализа в ГИС установлены районы с повышенной минерализацией и жесткостью грунтовых вод. На основе комплексного подхода выполнено районирование и проведена оценка современного гидрогеохимического состояния ресурсов грунтовых вод территории исследования.

Ключевые слова: геоинформационные методы, моделирование, пространственно-временные изменения, Чоп-Мукачевский бассейн, грунтовые воды, химический состав, мониторинг, база данных, защищенность.

Наукове видання



ВІСНИК
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ГЕОЛОГІЯ

Випуск 4(91)

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. 12,1. Наклад 300. Зам. № 220-9943.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл4.
Підписано до друку 17.11.2020

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