

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

Відповідальний за випуск О. І. Меньшов

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР</b>     | С. А. Вижва, д-р геол. наук, проф.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ</b>    | О. В. Шабатура, д-р геол. наук, доц. (заст. головн. ред.); О. І. Меньшов, д-р геол. наук, ст. дослідник (відп. ред.); Г. В. Артеменко, д-р геол. наук, проф.; В. Г. Бахмутов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; З. О. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О. В. Дубина, д-р геол. наук, доц.; В. М. Загнітко, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; В. І. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.; О. М. Іванік, д-р геол. наук, проф.; О. М. Карпенко, д-р геол. наук, проф.; І. М. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; О. Є. Кошляков, д-р геол. наук, проф.; В. Г. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; Б. П. Маслов, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О. В. Митрохин, д-р геол. наук, проф.; В. А. Михайлов, д-р геол. наук, проф.; Г. П. Міліневський, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; В. А. Нестеровський, д-р геол. наук, проф.; В. В. Огар, д-р геол. наук, проф.; М. І. Орлюк, д-р геол. наук, проф.; О. Л. Шевченко, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; В. В. Шевчук, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; С. Є. Шнюков, д-р геол. наук, доц.; Т. В. Пастушенко, канд. філол. наук, доц.; Т. А. Мірончук, канд. філол. наук, доц. |
| <b>Адреса редколегії</b>     | Іноземні члени редакційної колегії:<br>А. Веснавер, Італійський національний інститут океанографії та прикладної геофізики, Італія; Т. Діндароглу, Університет Кахраманмарас Сутцу Імам, Туреччина; А. Ель Албані, Університет Пуатьє, Франція; К. Зенг, Китайський геологічний університет; Китай, О. Івахненко, Казахстансько-Британський технічний університет, Казахстан; А. Коронеос, Університет Арістотеля в Салоніках, Греція; К. Лі, Китайський геологічний університет, Китай; М. Олівія, Лісабонський університет, Португалія; П. Перейра, Університет Миколаса Ромеріса, Литва; В. Портнов, Карагандинський державний технічний університет, Казахстан; С. Спассов, Геофізичний центр Доурбес, Бельгія; В. Шмідт, Університет Мюнстера, Німеччина<br>ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна;<br>☎ (38044) 431 04 40; електронна адреса: geolvisnyk@ukr.net;<br>http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Затверджено</b>           | Вченою радою ННІ "Інститут геології"<br>14 грудня 2022 року (протокол № 5)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Атестовано</b>            | Вищою атестаційною комісією України.<br>Постанова Президії ВАК України<br>№ 1-05/6 від 12.06.02                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Зареєстровано</b>         | Міністерством юстиції України.<br>Свідоцтво про Державну реєстрацію КВ № 23534-13374 від 08.08.18                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Засновник та видавець</b> | Київський національний університет імені Тараса Шевченка,<br>Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"<br>Свідоцтво внесено до Державного реєстру<br>ДК № 1103 від 31.10.02                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Адреса видавця</b>        | б-р Тараса Шевченка, 14, Київ, 01601, Україна;<br>☎ (38044) 239 32 22, 239 31 72; факс 239 31 28                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

**UDC 504+550+551+552+624**

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

Chief publication manager O. Menshov

**EDITOR-IN-CHIEF  
EDITORIAL BOARD**

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

**Ukrainian Members:**

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

**Foreign members:**

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

**Address**

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

**Approved by the**

Academic Council of the Institute of Geology  
December 14, 2022 (Minutes # 5)

**Certified by the**

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

**Certified by the**

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

**Founded and published by**

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

**Address**

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

**ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ**

|                                                                                                                                                 |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Іванік О., Тустановська Л., Гадяцька К.</b><br>Неотектоніка та морфоструктурні особливості рельєфу правобережжя Середнього Придніпров'я..... | 5 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

**ГЕОФІЗИКА**

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Бондар К., Вижва С., Шейко І., Козленко Р.</b><br>Польові методи археологічної геофізики у світі та в Україні: витоки, становлення, сучасність ..... | 12 |
| <b>Кравець С., Малицький Д., Асташкіна О.</b><br>Актуальні підходи до адаптації сейсмічних датчиків для техногенно навантажених територій .....         | 25 |
| <b>Гахраманли С.</b><br>Результати геофізичного моніторингу розроблення горизонту ПК-2<br>Підкирмакінської світи родовища нафти Дашлари .....           | 31 |

**ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН**

|                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Михайлов В., Вижва С., Паюк С.</b><br>Системний аналіз мінерально-сировинної бази стратегічних корисних копалин України .....                                                         | 36 |
| <b>Степанюк Л., Загнітко В., Довбуш Т., Коваленко Н., Зюльцле О., Яськевич Т.</b><br>U-Pb геохронологія кристалічних порід Вільшанського кар'єру (Середнє Побужжя, Український щит)..... | 45 |
| <b>Мансуров М.</b><br>Геохімічні особливості рудно-порфірової мінералізації у магматичній системі Гошгарчай<br>(Муровдарський район, Азербайджанська частина Малого Кавказу) .....       | 51 |
| <b>Ганжа О., Кузьманенко Г., Охоліна Т., Ремезова О.</b><br>Сучасний стан мінерально-сировинної бази розсіпних родовищ титану України .....                                              | 60 |

**ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ**

|                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Кошляков О., Диняк О., Чомко Д., Кошлякова І.</b><br>Оцінювання фільтраційної складової водного балансу озера Лебедине (Сумська область).....                                                                                  | 67 |
| <b>Люта Н., Саніна І.</b><br>Умови формування якісного стану водоносних горизонтів у басейні річки Південний Буг.....                                                                                                             | 73 |
| <b>Левонюк С., Удалов І.</b><br>Розроблення заходів для підвищення екологічної безпеки питного водопостачання населення Східної України<br>за рахунок використання підземних вод Буцацько-Канівського водоносного комплексу ..... | 80 |

**ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА**

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Ляшенко Д., Цюпа І., Бабій В. Чехній В.</b><br>Забезпечення якості геоекологічних карт на етапах створення і використання..... | 85 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**ПОДІЇ**

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Вітаємо із 85-річним ювілеєм Георгія Трохимовича Продайводу!</b> ..... | 95 |
| <b>Вітаємо із 75-річним ювілеєм Миколу Васильовича Реву!</b> .....        | 97 |

---

## CONTENTS

---

### GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

|                                                                                                                                                                 |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Ivanik O., Tustanovska L., Hadiatska K.</b><br>Neotectonics and morphostructural features of the relief of the right bank of the Middle Dnieper region ..... | 5 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

### GEOFYSICS

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Bondar K., Vyzhva S., Sheiko I., Kozlenko R.</b><br>Archaeological geophysics in the world and in Ukraine: beginning, development, present .....              | 12 |
| <b>Kravets S., Malytskyy D., Astashkina O.</b><br>Actual approaches to the adaptation of seismic sensors for the man-caused territories .....                    | 25 |
| <b>Gahramanli S.</b><br>Results of geophysical monitoring of the development of the horizon PK-2<br>of the Podkirmakinsky suite of the Neft Dashlary field ..... | 31 |

### MINERAL RESOURCES

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Mykhailov V., Vyzhva S., Paiuk S.</b><br>System analysis of the mineral raw material base of strategic minerals of Ukraine .....                                                        | 36 |
| <b>Stepaniuk L., Zagnitko V., Dovbush T., Kovalenko N., Zülzle O., Yaskevych T.</b><br>U-PB geochronology of crystalline rocks of Vilshan mine (Middle Bug, Ukrainian Shield) .....        | 45 |
| <b>Mansurov M.</b><br>Geochemical features of copper porphyry mineralization in the Goshgarchay ore magmatic system<br>(Murovdag ore region, Azerbaijan part of the Lesser Caucasus) ..... | 51 |
| <b>Ganzha O., Kuzmanenko H., Okholina T., Remezova O.</b><br>Current state of mineral base of titanium deposits of Ukraine .....                                                           | 60 |

### HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

|                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Koshliakov O., Dyniak O., Chomko D., Koshliakova I.</b><br>Assessment of the filtration component of the water balance of Lebedyne Lake (Sumy region) .....                                                    | 67 |
| <b>Lyuta N., Sanina I.</b><br>Conditions for the formation of aquifers qualitative state in the southern Bug River basin .....                                                                                    | 73 |
| <b>Levoniuk S., Udalov I.</b><br>Development of measures to increase the ecological safety of drinking water supply for population<br>of Eastern Ukraine due to the use of Buchak-Kaniv aquifer groundwater ..... | 80 |

### GEOINFORMATICS

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Liashenko D., Tsiupa I., Babiy V., Chekhniy V.</b><br>Geoecological maps quality assurance at the stages of creation and use ..... | 85 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### EVENTS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Happy 85<sup>th</sup> Birthday Anniversary!</b><br>Happy 85th birthday, Heorgii Prodaivoda! ..... | 95 |
| <b>Happy 75<sup>th</sup> Birthday Anniversary!</b><br>Happy 75th birthday, Mykola Reva! .....        | 97 |

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

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

## НЕОТЕКТОНІКА ТА МОРФОСТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ РЕЛЬЄФУ ПРАВОБЕРЕЖЖЯ СЕРЕДЬНОГО ПРИДНІПРОВ'Я

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

На основі комплексного структурно-морфометричного аналізу, методів дистанційного зондування Землі та просторового моделювання проаналізовано еволюцію різномасштабних морфоструктур правобережжя Середнього Придніпров'я. На основі створених структурно-морфометричних моделей виявлено особливості тектогенезу та морфогенезу впродовж неоген-четвертинного часу. Охарактеризовано регіональні та локальні структури та визначено амплітуди новітніх і сучасних рухів земної кори в їхніх межах. Підтверджено складний взаємозв'язок енде- та екзогенного рельєфоутворення і охарактеризовано роль льодовикового впливу на формування рельєфу. Визначено характер взаємозв'язку між структурно-тектонічними процесами та розвитком небезпечних геологічних процесів. Польовими геолого-геоморфологічними дослідженнями виявлено характерні структурно-тектонічні особливості блокових структур та їхній вплив на окремі фактори геоморфогенезу. Тектоно-геоморфологічне моделювання з урахуванням морфоструктурного аналізу проілюструвало формування рельєфу різних типів в умовах змінних ритмів енде- та екзогенних процесів.

**Ключові слова:** структурно-морфометричний аналіз, поверхня вирівнювання, вершинно-базисна поверхня, неотектогенез, морфогенез, тектонічні рухи, геодинаміка, амплітуда коливань висот рельєфу, залишковий рельєф, зсувні процеси.

**Вступ та постановка проблеми.** Досліджуваний регіон приурочений до схилу Українського щита, складеного ранньодінокаембрійськими структурно-формаційними комплексами, розчленованими різновіковими і різнопорядковими розломами на систему блоків, перекритих малопотужними фанерозойськими утвореннями.

Загальні риси рельєфу регіону формувались упродовж неоген-четвертинного часу переважно завдяки диференційованим тектонічним рухам. Останні полягали у неоднаковій інтенсивності підняття і опускання окремих блокових структур Українського щита.

Геоморфологічні ознаки новітньої активізації блокових структур доповнюються проявами голоценових і сучасних рухів земної кори, зокрема деформуванням повздовжніх профілів русел рік та яружних систем. Серед екзогенних процесів, які продовжують діяти й у сучасний період, виділяються діяльність текучих вод і розвиток небезпечних гравітаційних процесів, зокрема зсувоутворення вздовж високих правих берегів.

Прогнозне оцінювання таких явищ потребує ретельних геолого-геоморфологічних досліджень із залученням різноманітних методів. Одним із ефективних методів дослідження регіональних і локальних структур платформених областей, виявлення особливостей новітнього тектогенезу та морфогенезу є метод структурної морфометрії, що полягає у визначенні величини некомпенсованих рухів земної кори та величини денудаційного зрізу, амплітуд коливань висот рельєфу й ерозійно-денудаційних процесів.

**Інтерпретація отриманих результатів за картами різниць вершинно-базисних поверхонь.** На основі структурно-морфометричних досліджень, просторового аналізу та математичного моделювання створено низку структурно-морфометричних побудов (карти базисних і вершинних поверхонь, різниць між вершинними та базисними однопорядковими поверхнями, різниць суміжних базисних поверхонь і карти залишкового рельєфу), які дозволили проаналізувати геоморфологічну і тектонічну еволюцію Середнього Придніпров'я впродовж новітнього

та сучасного етапів розвитку. Структурно-морфометричні дослідження виконано із застосуванням методики, описаної у попередніх публікаціях (Ivanik et al., 2020). На основі отриманих моделей побудовано динамічні карти рельєфу, до них належать карти вершинно-базисних поверхонь семи порядків (Ivanik et al., 2019). Саме ці карти дали змогу простежити динаміку блокових структур правобережжя Середнього Придніпров'я в неоген-четвертинний період. Для дослідження неотектонічних геотектурних структур, які прямо або опосередковано виражені у рельєфі та пов'язані з давніми блоковими структурними формами, було залучено комплекс методів, зокрема польові геолого-геоморфологічні дослідження, дешифрування космічних знімків, геоморфологічний аналіз, структурно-тектонічний аналіз тощо.

Для аналізу амплітуд диференційованих тектонічних рухів земної кори в межах окремих блоків, а також для вивчення динаміки розвитку локальних структур використано карти різниць вершинно-базисних поверхонь, що дозволяють визначати переміщення земної кори разом із денудацією та акумуляцією за короткий проміжок часу. Слід зазначити, що різниці між базисними та вершинними поверхнями є сумарним алгебраїчним результатом додатних і від'ємних вертикальних рухів земної кори, а також схилової та руслової акумуляції, схилової денудації і руслової ерозії (Философов, 1975). На дослідженій території простежується долина система нижчих порядків, які за методикою впадають у долину вищого порядку, мають глибокий вріз та крутість схилів. Такі явища спостерігаються по всіх схилах правобережжя Дніпра та розгалуженої яружної системи. Саме в таких випадках картами різниць вершинно-базисних поверхонь нижчих порядків зафіксовано не тільки зміни тектонічного плану території, але й глибинну ерозію.

Для опису карт різниць вершинно-базисних поверхонь використано спрощену трактовку – карти різниць відповідних порядків. Карти різниць найвищих шостого та сьомого порядків є динамічними та ілюструють найдавнішу епоху формування рельєфу території, характеризують

дочетвертинний (міоцен-пліоценовий) період (Іванік та Тустановська, 2011). Порівняння цих двох карт показують, як у межах Обухівського блоку змінюються амплітуди коливань висот рельєфу: вони зростають від 40 до 80 м. Саме в неогеновий період територія України почала повністю звільнятися від Сарматського моря, у цей час важливу роль відігравала діяльність поверхневих текучих вод та інтенсивна ерозійна діяльність (рис. 1). Максимальні

амплітуди приурочені до локальних форм, що належать сучасній долині ріки Стугна, які складені еоценовими породами середнього палеогену канівського та бучацького регіорусів, представлені піщано-глинистими та піщаними прибережно-морськими утвореннями, що трансгресивно з кутовою неузгодженістю залягають на породах кристалічного фундаменту юри та крейди.

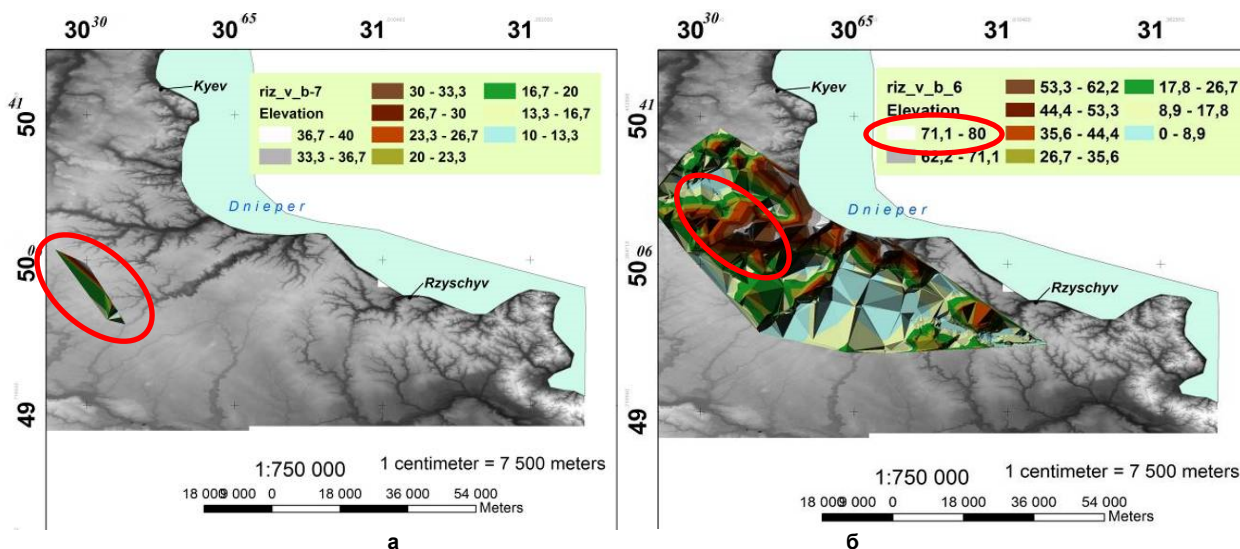


Рис. 1. Карти: (а) різниці між вершинною та базисною поверхнями сьомих порядків і (б) різниці між вершинною та базисною поверхнями шостих порядків

Потужність кожного ярусу сягає до 30 м. Імовірно, саме в дочетвертинний період разом із висхідними рухами закладалася яружна система. Такі процеси часто порушують підземні водні горизонти, які розвантажуються в руслах ярів, формуючи постійні водотоки. За таких умов зароджувалася долина правої притоки Дніпра (р. Стугна), складена водоносними крейдовими породами, що незгідно залягають на юрських глинах. Останні на ділянці Обухівського блогу залягають на глибині 36,5 м. Максимальний показник амплітуд висот (80 м) приурочений до гирла р. Стугни. Саме на цій ділянці зденудовані породи канівського та бучацького регіорусів, що свідчить про одночасну дію енде- та екзогенного факторів.

Також інтенсивних змін зазнали інші ділянки, приурочені до сучасних долин правих приток Дніпра, зокрема річки Красна та Бобриця. Долина річки Бобриця успадкувала Бобринецький розлом (Галиєнко, 1992), уздовж якого фіксуються максимальні амплітуди коливань висот рельєфу. Активізація розломів характеризує блокові переміщення, які часто визначають орієнтування річкової мережі та інтенсивність процесів розмиву й осадконакопичення. Здебільшого це характерно для водотоків, що формувались у пухких піщано-глинистих породах, які легко розмивалися. Таку тенденцію зафіксовано в гирлі рік Красна та Бобриця, що складені достатньо потужними (50 м) породами бучацької і канівської серії (Інженерно-геологічне довивчення..., 2007).

Карта різниці п'ятого порядку демонструє як додатні, так і від'ємні показники переміщень на початку четвертинного періоду (еоплейстоцен), які фіксуються в межах окремих блоків Середнього Придніпров'я, маркуючи зони із різноамплітудними тектонічними рухами (рис. 2). У цей час у зоні слабких низькоамплітудних піднять (50-66 м) залишається Обухівський блок. На Київському блоці (м. Київ) відбувається ерозійна діяльність р. Дніпро, що розмиває

середньопалеогенові породи, латерально вигинаючи долину в західному напрямку. На сучасних схилах долин річок Стугна та Красна за картою залишкового рельєфу п'ятого порядку виділяються ділянки з показниками від 13,5 до 22 м, які приурочені до середини рік. Саме ці карти демонструють денудаційну діяльність. Імовірно, на той час це були верхів'я яружно-балкової системи, де активно розвивалися ерозійні процеси.

У межах Канівсько-Трахтемирівського блоку максимальна амплітуда загалом становить 82 м з відносно високим залишковим рельєфом до 31 м, який має диференційований характер. Лише вододільні простори Правобережжя, складені породами неогенової системи, виявленими лише в межах досліджуваного регіону і представленими пісками новопетрівської світи, строкатими та червоно-бурими глинами, перебували у спокійному тектонічному режимі. На тлі позитивних даних, що демонструють висхідні тектонічні зміни території, отримано нульові значення (0-16 м). Саме зона Бобринецького розлому та долина р. Либідь у цей час займають найнижче положення на всьому правобережжі Дніпра, що свідчить про її структурно-тектонічну активність (рис. 2).

У ранньому та на початку середнього неоплейстоцену на рельєфоутворення та осадконакопичення істотно вплинули гляціальні процеси, пов'язані із формуванням покривного зледеніння (переважно дніпровського). У цей час активність тектонічних процесів знижується. Однак на границях окремих структур і в межах розвитку розломних зон як регіонального, так і локального масштабу, фіксуються незначні амплітуди тектонічних коливань, у середньому 50 м по всій території Правобережжя. У період дніпровського зледеніння розвиток рельєфу був підпорядкований не тільки дії льодовикового покриву, а й впливу неотектонічних рухів. Льодовикове навантаження контролюється стисненням шарів, їхньою стійкістю і ступенем

пластичності. На певних глибинах при навантаженнях перевищувались пороги стійкості гірських порід і відбувалась пластична деформація, інтенсивність якої залежала не лише від навантаження, але й від коефіцієнта в'язкості, жорсткості порід, часового фактора, температури, періоду дії навантаження, геологічної будови матеріалу та інших чинників. Вплив цих факторів зумовлює активізацію денудаційних процесів у зонах сучасних річкових долин, тим самим вирівнюючи вододільні простори. Почався тривалий процес вирівнювання складного рельєфу, утвореного внаслідок нагромадження льодовикових відкладів. Привертають увагу ділянки долин сучасної річкової системи, зокрема р. Стугна, де

спостерігаються зменшення висот майже на ту потужність (13,5 м), яка була прогнозована залишковим рельєфом попередньої стадії (рис. 3). Незначні коливання різниць у межах більшої частини району можуть свідчити про денудаційне вирівнювання території та компенсаційне денудаційно-аккумулятивне нагромадження.

Активізація дрібноблокових рухів під час насування дніпровського льодовика, що виражені у локальних максимальних показниках (60 м) у районі Канівсько-Трахтемирівського блоку, простежуються за аналізом карти різниці вершинно-базисної поверхні четвертого порядку (Тустановская, 2014).

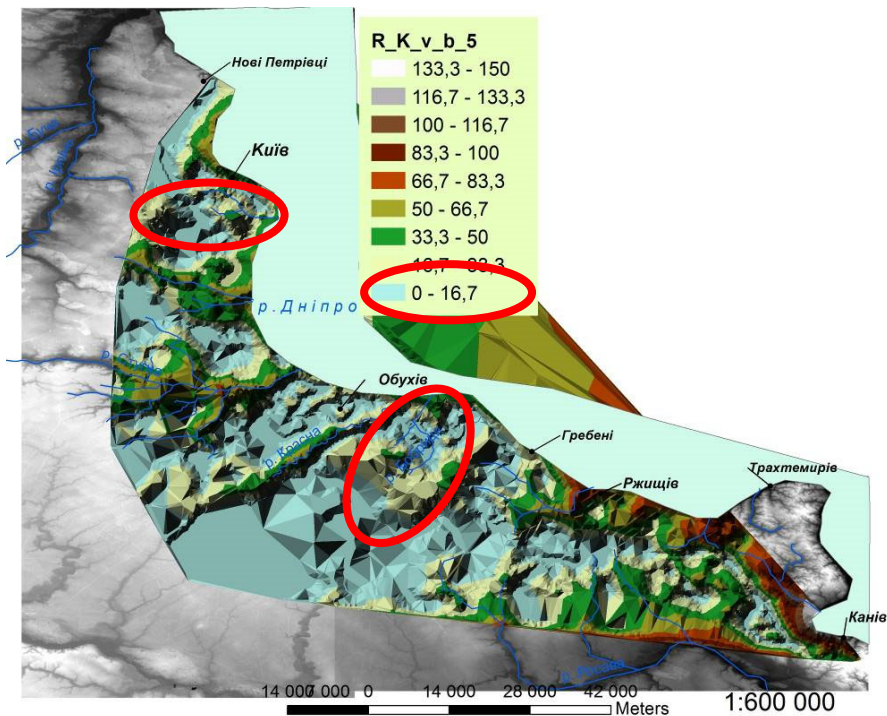


Рис. 2. Карта різниці між вершинною та базисною поверхнями п'ятих порядків

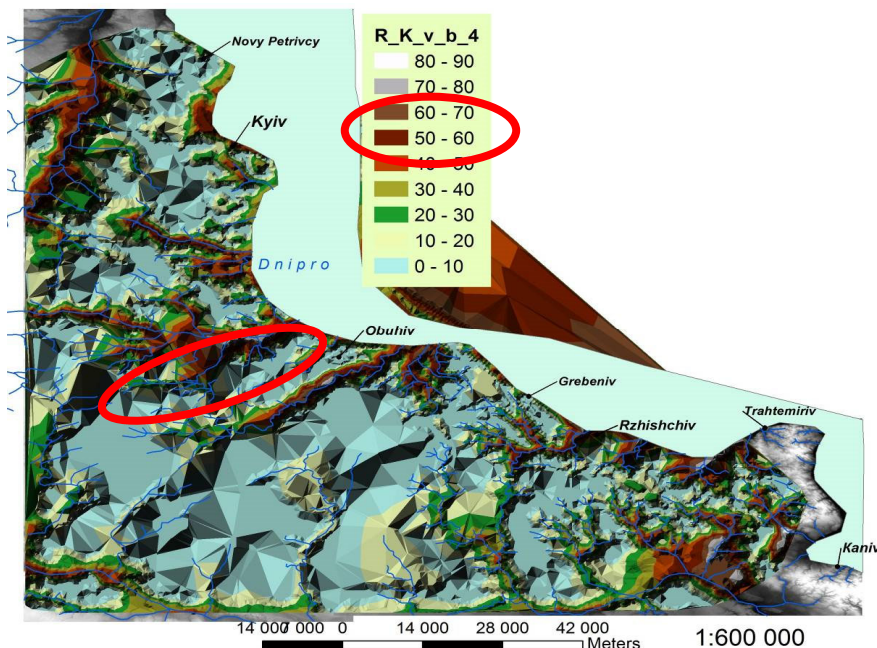


Рис. 3. Карта різниці між вершинною та базисною поверхнями четвертих порядків

У післяльодовиковий час (кінець середнього, початок пізнього неоплейстоцену) диференційовані тектонічні рухи земної кори та водно-льодовикові процеси вплинули на морфоструктурний план Середнього Придніпров'я та особливості формування генетичних типів відкладів. У цей час найактивніша висхідна динаміка з амплітудами 60–75 м спостерігається уздовж долин Дніпра та на Канівсько-Трахтемирівському блоці по лінії схилу. Значні висотні показники пов'язані насамперед з ерозійною діяльністю р. Дніпро, що зумовлює швидке руйнування пухких порід та утворення різких уступів. Нульові показники добре підкреслюють блокові структури, особливо виразно розмежовуються Канівський, Трахтемирівський і Обухівський блоки, що розчленовуються прохідною лінійною долиною з північного заходу на південний схід (рис. 4). Можливо, це ерозійне пониження утворилося під дією талих льодовикових вод і закладалося по гляціотектонічним розломам (Лаврушин, Чуєвський, 1982). Характерною ознакою таких переміщень є значна зміна елементів залягання лускувато-насувних структур обох блоків та

спряжена дислокованість порід дрібнокупольними ін'єктивними формами. Усі зміни із відповідними характеристиками фіксуються на карті різниці третього порядку.

Отже, як видно із рис. 4, на всьому правобережжі Середнього Придніпров'я зберігаються незначні зміни висотних показників, що свідчить про відносну стабільність тектонічного режиму регіону. Привертає увагу карта залишкового рельєфу третього порядку, на якій виокремлюється локальна ділянка з потужністю залишкового рельєфу до 50 м (район Нові Петрівці), складена елювіально-еоловими відкладами верхнього неоплейстоцену, що залягають на червоно-бурих глинах нижнього неогену (рис. 5). Саме такі зони з високим показником залишкового рельєфу в майбутньому є небезпечними для зсувних та обвальних процесів. Подібне розташування залишкового рельєфу, але з меншими показниками (15 м), зафіксовано на схилах сучасних річкових систем Правобережжя, які складені переважно моренними відкладами, що також є причиною розвитку ерозійно-аккумулятивних процесів.

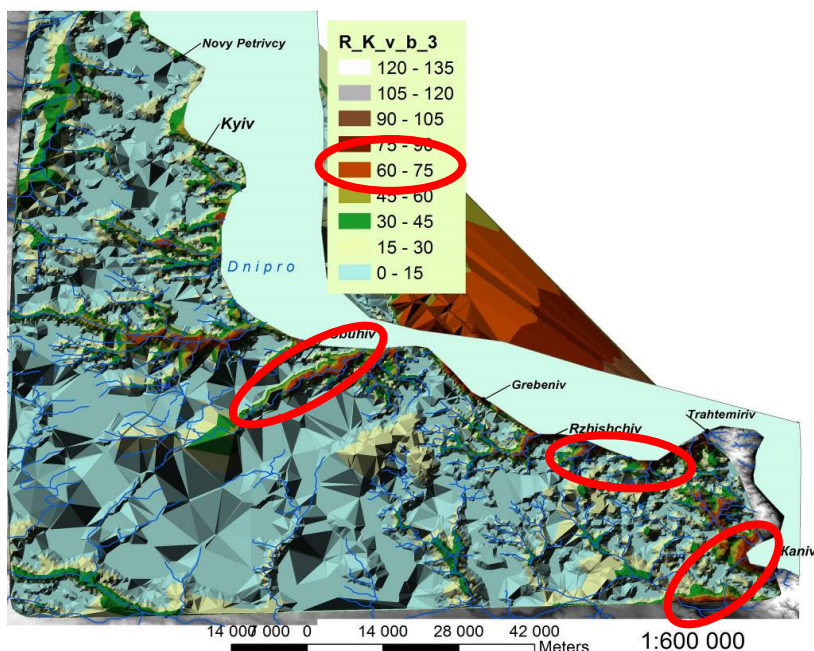


Рис. 4. Карта різниці між вершинною та базисною поверхнями третій порядків

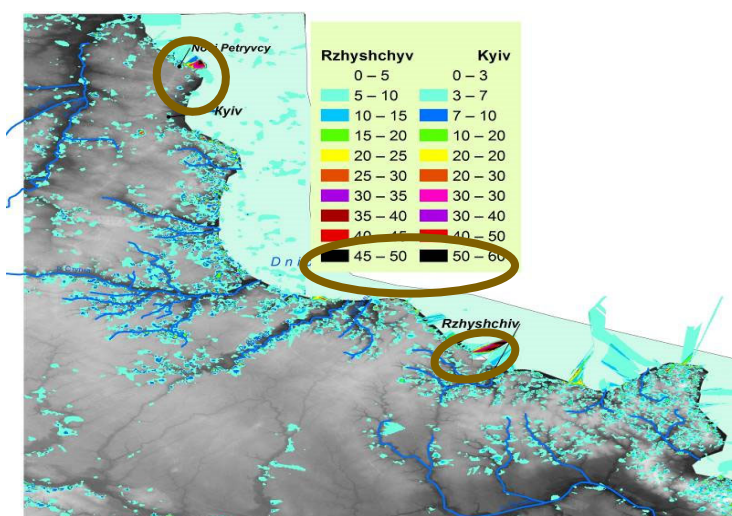


Рис. 5. Карта залишкового рельєфу третього порядку (різниця між гіпсометричною поверхнею та базисною поверхнею третього порядку)

У кінці *пізнього неоплейстоцену – голоцену* (карта різниці вершинно-базисної поверхні другого порядку) після тривалої стабільності відновлюються епейрогенічні рухи з позитивними амплітудами до 75 м, висока інтенсивність яких припадає на зони ерозійної діяльності на Київському та Обухівському блоках. Вони приурочені до долин сучасних річок (Ірпінь, Стугна, Красна та ін.). Одночасно із висхідними переміщеннями активізуються схилі та ерозійні процеси, що зумовлюють формування чітко окресленої гідрографічної мережі, профіль рівноваги яких недостатньо вироблений (*Інженерно-геологічне доведення...*, 2007). Це видно із максимальних показників, які

фіксуються переважно в середніх частинах річкових долин, де схили долин представлені делювіально-еоловими відкладами верхнього неоплейстоцену та голоцену, і розвивається глибинна ерозія (рис. 6). Уздовж усього правого схилу Дніпра продовжує розвиватися руйнівна ерозійна діяльність, проявлена у вигляді тонкої смуги уступів з висотними показниками до 50 м, що складені породами палеогену та неогену. Останні представлені товщею червоно-бурих глин, розповсюджених на схилах Київського блоку, і товщею строкатих глин, розповсюджених переважно в межах Обухівського блоку, які трансгресивно залягають на палеогенових породах.

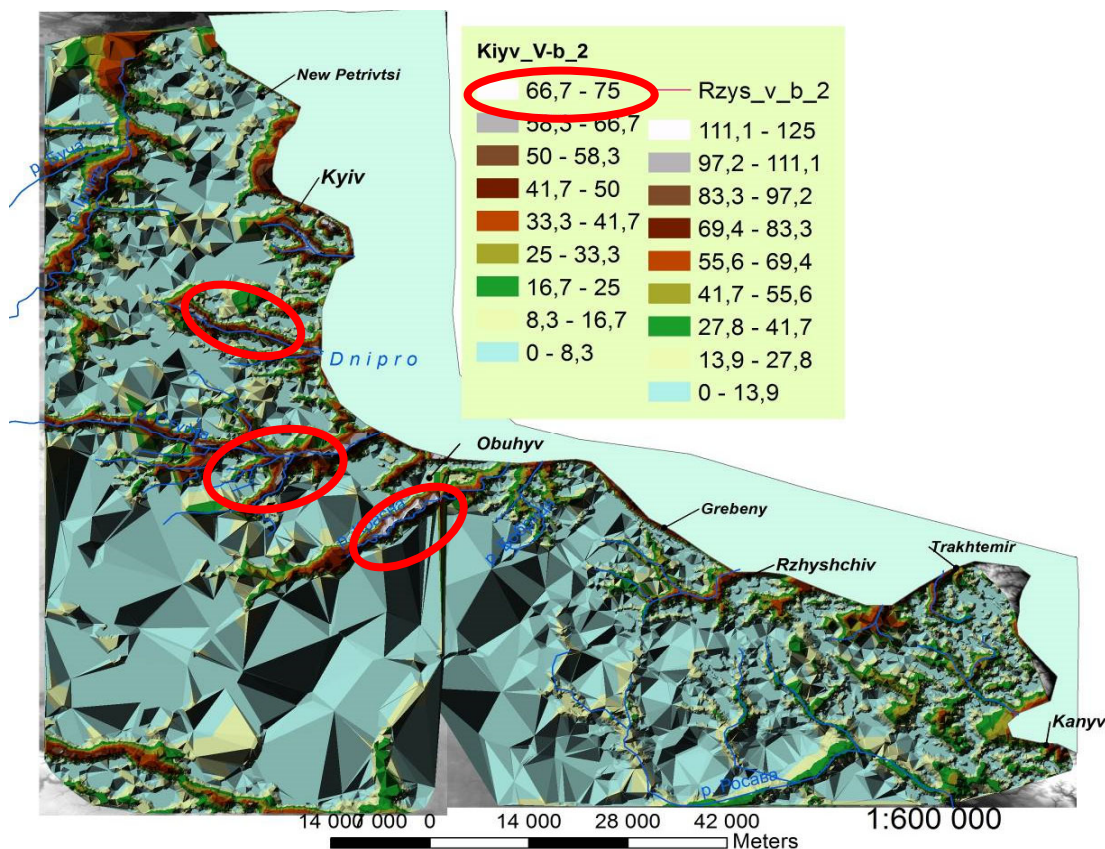


Рис. 6. Карта різниці між вершинною та базисною поверхнями других порядків

Південні території правобережжя Середнього Придніпров'я, у тому числі Канівсько-Трахтемирівський блок, переважно характеризуються тектонічною стабільністю – 0–13,9 м, але з ерозійно-денудаційними проявами. Для правих приток долини Дніпра, зокрема долини ріки Росава з її притоками, особливо характерні ділянки зі слабкою ерозійною активністю. Цьому сприяє, імовірно, мала потужність залишкового рельєфу на південно-західних ділянках Канівсько-Трахтемирівського блоку.

Диференціацію сучасних тектонічних рухів земної кори Середнього Придніпров'я відображає карта різниці вершинно-базисної поверхні першого порядку (рис. 7). У сучасному морфоструктурному плані найбільша тектонічна активність з амплітудами підняття до 62 м спостерігається в межах північно-східної частини Київського блоку, у гирлі долини Бобринця із прилеглими до неї ділянками та біля населених пунктів Стайки та Гребені. У ході польових досліджень спостерігалась зсувна активність на узбережжі Київського водосховища (околиці села Нові Петрівці). Стратиграфічний розріз схилу представлений аргілітизованими палеогеновими відкладами потужністю до 10 м,

на яких незгідно залягають зцементовані каоліністі піски новопетрівської світи. У межах палеогенової пачки фіксується розвантаження підземних вод у вигляді постійного водотoku, який впадає у водосховище (*Рудько і Осижук, 2012*). Саме такі зони було зафіксовано картою залишкового рельєфу другого порядку з потужністю до 40 м на ділянці в районі Нові Петрівці й до 13 м у м. Київ (рис. 8).

Значно меншими амплітудами тектонічних підняття (до 30 м) характеризуються ділянки Канівсько-Трахтемирівського блоку. У ході польових досліджень Канівського блоку у верхів'ях яру Меланчин Потік зафіксовано різкий вріз русла до 1,5 м. Активна ерозійно-денудаційна діяльність, зсувні тіла, що містяться у підніжжі схилів, а в деяких випадках перекривають русла, зазначається і в інших ярах блоку. Багато ярів мають постійні водотоки, зокрема яр Меланчин Потік, відвершки якого розчленовують Чернечу гору (музей Тараса Шевченка), що призводить до зволоження цокольних приміщень музею. Результати таких явищ зафіксовані у залишковому рельєфі на всьому Канівсько-Трахтемирівському блоці (рис. 8).

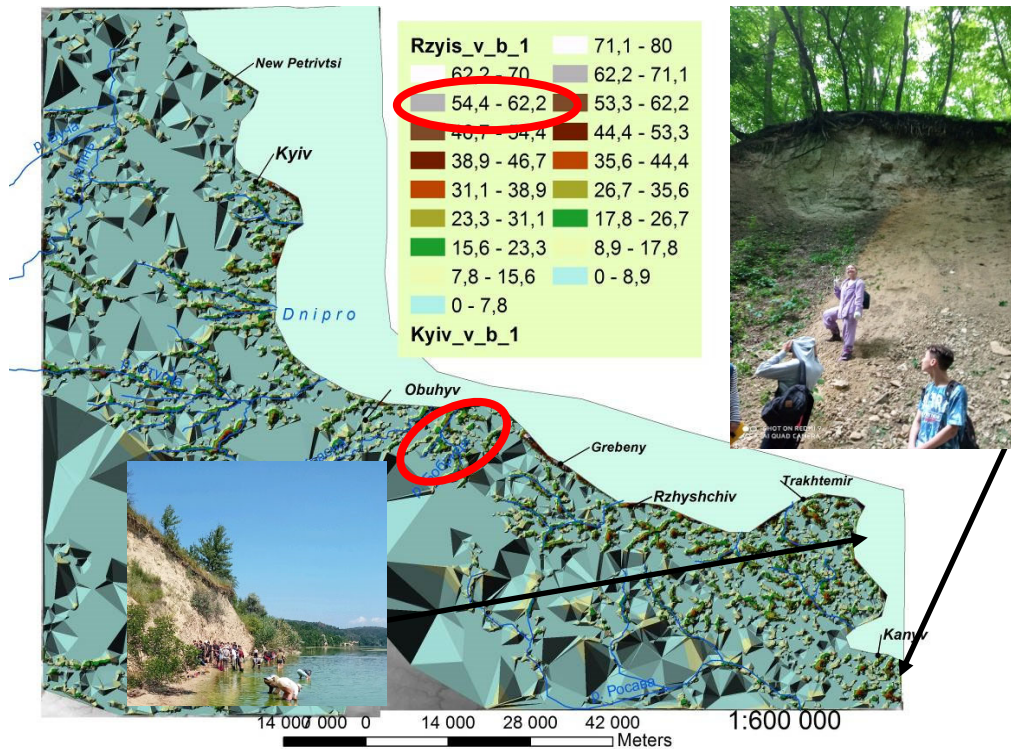


Рис. 7. Карта різниці між вершинною та базисною поверхнями перших порядків

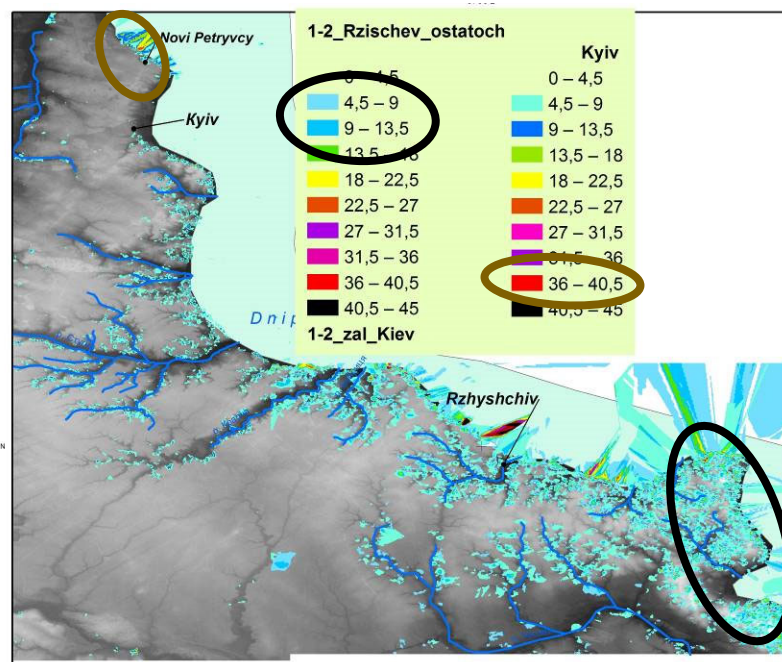


Рис. 8. Карта залишкового рельєфу другого порядку (різниця між гіпсометричною поверхнею та базисною поверхнею другого порядку)

**Висновки.** На основі комплексних геолого-геоморфологічних досліджень та структурно-морфометричного аналізу охарактеризовано напрямки та характер новітніх і сучасних тектонічних рухів у межах Київського, Обухівського та Канівсько-Трахтемирівського блоків. Поглиблений аналіз геолого-геоморфологічної інформації і розроблених структурно-морфометричних моделей даних дозволив визначити амплітуди тектонічних рухів упродовж неоген-четвертинного етапу.

На основі отриманих даних було зафіксовано активність неотектонічних рухів у співвідношенні з ерозійно-

денудаційними процесами на Київському блоці в середньому неоплейстоцені (льодовиковому) та пізньому неоплейстоцені з амплітудами до 70 м.

Обухівський блок має диференційований тектонічний розвиток, найвищі амплітуди висхідних рухів фіксуються в дочетвертинний період (до 80 м) і в період зледеніння (до 90 м), приурочених переважно до сучасних долин річкової системи.

Активізація підняття Канівсько-Трахтемирівського блоку припадає на початок четвертинного періоду – 133 м, їхня активність поступово спадає, лише зберігається

піднімання окремих локальних структур на кожній стадії розвитку, що притаманне саме цій території з її структурно-тектонічними особливостями геологічної будови.

Охарактеризований геодинамічний режим території Середнього Придніпров'я та диференційований характер тектонічних рухів є головною передумовою розвитку небезпечних геологічних процесів, прояв яких чітко залежить від характеру, направленості та інтенсивності тектонічних рухів у межах окремих блоків.

#### Список використаних джерел

Іванік, О.М., Тустановська, Л.В. (2011). Застосування класичних методик структурно-морфометричного аналізу для реконструкції новітнього тектогенезу на основі ГІС. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 53, 4-7.

Інженерно-геологічне довивчення території Київської, Чернігівської, Житомирської та Закарпатської областей з метою геологічного обґрунтування протизсувних заходів та геологічного забезпечення УІАС НС. (2007). Міністерство охорони навколишнього середовища України. Державна геологічна служба. Північне державне регіональне геологічне підприємство "Північгеологія". Центр гідрогеологічних та геолого-екологічних досліджень. Центр геофізичних досліджень. Звіт про інженерно-геологічне та геофізичне вивчення. Книга 1, 143. Отримано з <https://drive.google.com/file/d/1ArhRJam21JvtHt5439DgIobyc8AH8AQO/view>

Лаврушин, Ю.А., Чугунный, Ю.Г. (1982). Каневские гляциодислокации. М.: Наука, 99.

Палиенко, В.П. (1992). Новейшая геодинамика и ее отражение в рельефе Украины. К.: Наукова думка, 116.

Рудько, Г.И., Осюк, В.А. (2012). Инженерная геодинамика Украины и Молдовы (оползневые геосистемы). В 2 т. Черновцы, Букрек.

Тустановская, Л.В. (2014). Исследования зон новейших движений Среднего Приднепровья инструментами ГИС. Международный научно-технический и производственный электронный журнал "Наука о Земле", 3, 18-27.

Философов, В.П. (1975). Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов, 231.

Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., Gadiatska, K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177-186. doi:10.12911/22998993/102964.

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

E-mail: [om.ivanik@gmail.com](mailto:om.ivanik@gmail.com);

L. Tustanovska, PhD (Geol.),

E-mail: [lume4@ukr.net](mailto:lume4@ukr.net);

K. Hadiatska, PhD (Geol.),

E-mail: [katkravchuk@gmail.com](mailto:katkravchuk@gmail.com);

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

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

Ivanik, O.M., Shevchuk, V.V., Tustanovska, L.V., Hadiatska, K.P., Volkova, S.G. (2020). Estimation of neotectogenesis factors of the Middle Dnieper region by structural-morphometric method. 19th International Conference Geoinformatics 2020, 11-14 May 2020, Kiev.

#### References

Engineering and geological additional education of the territory of Kyiv Chernihiv, Zhytomyr and Transcarpathian regions for the purpose of geological justification of anti-landslide measures and geological support of the UIAS emergency. (2007). Ministry of Environmental Protection of Ukraine. State Geological Service. Northern State Regional Geological Enterprise "Severgeologiya". Center for Hydrogeological and Geological-Ecological Research. Center for Geophysical Research. *Report on engineering-geological and geophysical research*. Book 1, 143. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1ArhRJam21JvtHt5439DgIobyc8AH8AQO/view> [in Ukrainian]

Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., Gadiatska, K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177-186. doi:10.12911/22998993/102964.

Ivanik, O.M., Shevchuk, V.V., Tustanovska, L.V., Hadiatska, K.P., Volkova, S.G. (2020). Estimation of neotectogenesis factors of the Middle Dnieper region by structural-morphometric method. 19th International Conference Geoinformatics 2020, 11-14 May 2020, Kiev.

Ivanik, O.M., Tustanovska, L.V. (2011). Application of classical methods of structural-morphometric analysis for the reconstruction of a new tectogenesis based on GIS. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 53, 4-7. [in Ukrainian]

Lavrushyn, Y.A., Chugunnyi Y.G. (1982). Kanev glacioidislocations. Moscow, Science, 99. [in Russian]

Palyenko V.P. (1992). The latest geodynamics and its reflection in the relief of Ukraine. Kyiv, Naukova dumka, 116. [in Russian]

Philosophov, V.P. (1975). Fundamentals of the morphometric method for the search for tectonic structures. Saratov, 229. [in Russian]

Rudko, G.I., Osyuk, V.A., (2012). Engineering geodynamics of Ukraine and Moldova (landslide geosystems). In 2 vs. Chernovcy, Bukrek. [in Russian]

Tustanovska, L.V. (2011). Studies of the zones of recent movements in the Middle Dnieper region using GIS tools. International scientific, technical and industrial electronic journal "Earth Science", 3, 18-27. [in Russian]

Надійшла до редколегії 25.08.22

## NEOTECTONICS AND MORPHOSTRUCTURAL FEATURES OF THE RELIEF OF THE RIGHT BANK OF THE MIDDLE DNIEPER REGION

*On the basis of a complex structural-morphometric analysis, methods of remote sensing of the Earth and spatial modeling, the evolution of different-scale morphostructures of the right bank of the Middle Dnieper region is analyzed. Based on the created structural-morphometric models, the features of tectogenesis and morphogenesis during the Neogene-Quaternary time were revealed. The regional and local structures are characterized and the amplitudes of the latest and modern crustal movements within them are determined. The complex relationship between endogenous and exogenous relief formation has been confirmed, and the role of glacial influence on relief formation has been characterized. The nature of the relationship between structural-tectonic processes and the development of dangerous geological processes has been determined. Geological and geomorphological field studies revealed the characteristic structural and tectonic features of block structures and their influence on individual factors of geomorphogenesis. Tectonic-geomorphological modeling, taking into account morphostructural analysis, illustrated the formation of relief of various types under conditions of variable rhythms of endogenous and exogenous processes.*

**Keywords:** structural-morphometric analysis, leveling, vertex-basal surface, neotectogenesis, morphogenesis, tectonic movements, geodynamics, amplitude of relief elevation fluctuations, residual relief, strike-slip processes.

## ГЕОФІЗИКА

УДК 550.837:550.8.05

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.02>

К. Бондар, д-р геол. наук, наук. співроб.,

E-mail: [ks\\_bondar@ukr.net](mailto:ks_bondar@ukr.net);

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: [vyzhvas@gmail.com](mailto:vyzhvas@gmail.com);

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

І. Шейко, канд. іст. наук,

E-mail: [ira.sheiko@gmail.com](mailto:ira.sheiko@gmail.com),

Інститут археології НАН України,

просп. Героїв Сталінграда, 12, м. Київ, 04210, Україна;

Р. Козленко, канд. іст. наук,

E-mail: [rknozel@ukr.net](mailto:rknozel@ukr.net),

Національний історико-археологічний заповідник "Ольвія" НАН України,

вул. Ольвійська, 47, с. Парутине, Миколаївська обл., 57540, Україна

**ПОЛЬОВІ МЕТОДИ АРХЕОЛОГІЧНОЇ ГЕОФІЗИКИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ:  
ВИТОКИ, СТАНОВЛЕННЯ, СУЧАСНІСТЬ***(представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О. В. Шабатурою)*

Відоображено історію застосування геофізичних методів в археологічних дослідженнях вченими з Європи, США, колишнього СРСР та України. У 1950-х рр. дослідники швидко перейшли від перших вдалих спроб до виконання масових магнітних та електричних знімів, у 1980-х р. відбувся перехід до цифрової реєстрації під час польових спостережень, а також бурхливий розвиток засобів оброблення даних. Це, у свою чергу, зумовило впровадження до археологічної практики низки активних геофізичних методів, які потребують складних обчислень при обробленні сигналу та інверсії даних: георадарного методу, томографії електричного опору, індукційного методу тощо. На сучасному етапі гострої актуальності набувають питання інтерпретації даних усе більш детальних і масштабних геофізичних знімів у контексті розрізнення все більш слабких за контрастом фізичних властивостей і дрібних за розмірами неоднорідностей у ґрунтовому покриві. Підтвердження антропогенного і техногенного походження геофізичних аномалій шукають шляхом прямих вимірювань і моделювання фізичних показників ґрунтів та археологічної речовини. Також представлено здобутки вітчизняних геофізиків, які стали основою для великих сучасних археологічних проєктів і зробили археологічну геофізику фундаментальною складовою пам'яткоохоронних досліджень в Україні.

**Ключові слова:** геофізичні методи, археологічна пам'ятка, магнітометрія, методи опору, георадарний метод.

**Вступ.** Як серед широкого загалу, так і у професійному середовищі досі побутує думка про геофізичні дослідження як новітні археологічні методи і технології. Втім, застосування цих методів в археології має 70-річну історію, повну спроб, відкриттів і розчарувань, не тільки в Європі і світі, а й в Україні. Наша робота покликана ознайомити читача з історією розвитку археологічної геофізики як окремої наукової дисципліни на стику гуманітарної та природничої сфер знання.

Застосування геофізичних технологій для розв'язання завдань археології почалося з електричних та магнітних методів, які й досі залишаються найбільш важливими та інформативними (Aitken, 1974; Scollar et al., 1990).

Історія і хронологія впровадження геофізичних методів до археологічної практики нерозривно пов'язані з розвитком і появою нових вимірювальних систем, автоматизацією процедур оброблення і візуалізації даних, зростанням рівня обізнаності археологічної спільноти щодо пошукових можливостей геофізичних методів, вдосконаленням пам'яткоохоронного законодавства.

Становлення археологічної геофізики має розглядатися як безперервний процес, який мав як етапи розвитку в часі, так і територіальні особливості. Автор достатньо повного огляду застосувань магнітометрії в археології Т. Хербіш пропонує виділяти: 1) початок досліджень у кінці 1950-х – на початку 1960-х рр.; 2) поступовий розвиток у 1960–80х рр.; 3) бурхливий розвиток у 1980–90-х рр. – етап, який, на думку автора, продовжується дотепер (Herbich, 2015). Оскільки магнітометрія є провідним методом неруйнівної археологічної розвідки, то ця періодизація відображає загальні тренди розвитку

археологічної геофізики загалом, але, на нашу думку, шлях автоматизації та моторизації вимірювань, на який стала ця наукова галузь із другої половини 1990-х рр., слід виділити в окремий етап. Крім того, зараз, на наших очах відбувається поворот від кількості до якості знання, про що буде сказано під час висвітлення поточних здобутків геофізиків у межах комплексних археологічних проєктів. Основним предметом нашого розгляду стануть визначні віхи в розвитку кожного із трьох основних геофізичних методів (магнітометрії, методів опору, георадарного методу), оскільки досягнути тут тисячі публікацій, які існують на сьогодні за нашою темою, неможливо.

У нашому огляді висвітлений як світовий (європейський та американський) досвід, так і досвід у колишньому СРСР і далі в незалежній Україні, про який європейські дослідники майже не мали уявлення (Gaffney & Gatters, 2003; Herbich, 2015) аж до появи масштабних спільних проєктів у 2010-х рр., коли вражаючі напрацювання вітчизняних фахівців у 1960–90-х рр. стали поштовхом для сучасних високоточних і ультрадетальних досліджень, зокрема на пам'ятках трипільської культури (Кошелев, 2005б; Chapman et al., 2014; Rassman et al., 2014).

**Початок та здобутки геофізики у світовій археології.** Спроби здобути археологічні знання, не порушуючи цілісність ґрунтового покриву, із застосуванням прикладних методів досліджень відомі від 30-х рр. XX ст. (du Mesnil du Buisson, 1934), однак першими систематичними та результативними археолого-геофізичними дослідженнями у світі вважають роботи Р. Аtkінсона з вимірювання питомого електричного опору на археологічній пам'ятці у Дорчестері-на-Темзі. Використовуючи

просту чотирихелектродну установку, він здійснив успішне знімання, у результаті якого були виявлені рови та ями за пониженими значеннями електричного опору зложеного заповнення цих об'єктів, викопаних у кам'янистому ґрунті (Atkinson, 1953).

**Магнітометрія.** Найраніші спроби застосування магнітометра в археології були зроблені в Англії у 1956 р. (Belshé, 1957; Aitken, 1958), коли вперше було помічено, що горн з обпаленої глини спричиняє зміни в геомагнітному полі, які можна зафіксувати протонним магнітометром. М. Ейткін зауважив також, що можна виявляти ями, заповнення яких має підвищену намагніченість, і навіть зауважив, що величина аномалії залежить від вмісту гумусу і того, чи розводили там вогнище раніше. Дослідник назвав цей метод "magnetic prospecting" (магнітний пошук).

Наприкінці 1950-х – початку 1960-х рр. запит на розроблення геофізичного обладнання, яке відповідало б високим вимогам до чутливості та роздільної здатності методів при дослідженні археологічних об'єктів, підштовхнув до створення одразу кількох типів магнітометрів і різних модифікацій електрометричного устаткування. Зокрема, протонний магнітометр, яким користувались Дж. Белше та М. Ейткін, був розроблений в Оксфордському університеті вже за кілька років після того, як явище вільної прецесії протонів у магнітному полі Землі було вперше спостережене експериментально (Packard and Varian, 1954). Цей прилад важив 10 кг і мав чутливість 1 нТ, що дозволяло дослідникам впевнено реєструвати аномалії від британсько-римських печей, які становили близько 100 нТ і ровів (10–15 нТл). У кінці 1950-х рр. з'являються комерційні протонні магнітометри із чутливістю 1–10 гамма, а також перші градієнтметри на їх основі. Перший ферозондовий градієнтметр був також розроблений в Оксфорді та протестований на городищі раннього залізного віку у 1961 р. (Tite, 1961). Він вимірював градієнт вертикальної складової магнітного поля, мав чутливість 1 нТл і можливість запису на паперову стрічку, що дозволяло виконувати відносно детальні вимірювання на великих ділянках.

На початку 1960-х рр. американська дослідниця Е. Ральф, проводячи дослідження в Сибарісі (Греція), стикнулася з умовами, які вимагали більш чутливого інструменту, ніж протонний градієнтметр, використаний там раніше. Розкопки показали, що руїни грецького міста VI століття до н. е. розташовані на глибині від 4 до 6 м, покриті шарами алювіальної глини. Протонний градієнтметр виявився ефективним у пошуку археологічних споруд до глибини 3 м, що в цьому конкретному випадку дозволило дослідити лише залишки римської доби. Тоді американська компанія Varian Associates запропонувала археологам квантовий рубідієвий магнітометр з оптичним накачуванням із чутливістю у сто разів більшою, ніж у протонного магнітометра (0,01 гамма), який і був використаний для розв'язання описаної задачі (Ralph, 1964). Випробування показали, що вимірювання з рубідієвим магнітометром у диференціальній конфігурації (тобто один прилад записує варіації геомагнітного поля, а другий використовується власне для знімання) були в чотири рази швидшими, ніж із протонним магнітометром.

Різні модифікації геофізичних технологій і приладів проходили випробування на широкому розмаїтті пам'яток, серед яких римські табори, етруські некрополі, грецькі колонії, середньовічні індійські поселення, античні міста тощо. У 1960-х роках такі наукові центри, як Фонд Лерічі при Міланському університеті (Італія), Рейнський краєзнавчий музей у Бонні (Німеччина), Центр

геофізичних досліджень НЦНД у Гарші (Франція), Центр прикладних наук в археології при Музеї Університету Пенсільванії (MASCA) включили геофізичну розвідку до своєї практики. Цими організаціями виконані сотні знімань на пам'ятках Греції, Італії, Туреччині, Ірландії, Центральній Америці, у Сполучених Штатах та Канаді (Herbich, 2015).

У 1970-х рр. геофізичні методи стають важливими інструментами археологічного дослідження завдяки високій результативності при пошукових роботах у рутинній археологічній практиці, що особливо актуально за нагальної необхідності обстеження територій, запланованих під будівництво. Крім того, до цього часу було налагоджено масове виробництво апаратури, яка відповідала саме археологічним потребам, а також здійснювалась підготовка фахівців на базі кращих університетів і наукових центрів Європи.

До цього додалася нова тенденція в археології – прагнення до реконструкції ландшафту та довкілля в межах цілих культурних і географічних регіонів, а не тільки на окремих пам'ятках (Gaffney & Gater, 2003). Цей підхід заохочував застосування методів, які допомагали зрозуміти масштаби освоєння простору в минулому.

У 1980-ті та 1990-ті роки у європейських країнах і США швидко зростання кількості археологічних проєктів, у яких застосовані геофізичні методи, було зумовлене подальшим технологічним розвитком апаратури і методів оброблення інформації, змінами пріоритетів в археологічній науці та пам'яткоохоронному законодавстві і, нарешті, широким впровадженням геофізичних курсів до археологічних освітніх програм. Найважливішою технологічною зміною, яка відбулася у 1980-х рр., став остаточний перехід до більш чутливої апаратури з високою продуктивністю. Повільні протонні магнітометри поступилися приладам з більшою швидкістю (порядку 0,1 сек.) і роздільною здатністю в діапазоні від 0,1–0,01 (ферозондові) до 0,001 нТ (цезієві) із можливістю запису показань до пам'яті приладу.

Автоматизація вимірювань спричинила зростання продуктивності наземного знімання. Водночас поліпшення роздільної здатності даних, обумовлене підвищенням чутливості апаратури та щільності мережі спостережень, зумовило значне поліпшення ідентифікації археологічних об'єктів. Бурхливий розвиток комп'ютерної техніки вплинув на якість оброблення та інтерпретації даних, відкрив можливість використання більш складних алгоритмів. Поліпшені ПК стали спроможними підтримувати нові програмні комплекси для візуалізації геофізичної інформації, з'явилась можливість виявляти аномалії, які складно було побачити у паперовому графічному зображенні. У магнітометрії, наприклад, з'явилися карти у відтінках сірого кольору, які значно випередили за інформативністю карти ізоліній і стали загальноновизнаним стандартом для зображення даних.

Німецькі й австрійські геофізики у 1980-х роках відмовляються від використання протонних магнітометрів на користь цезієвих, які вони застосовували як у конфігурації градієнтметра (на ділянках із високим рівнем магнітних завад – біля ЛЕП, електропотягів тощо), так і в диференціальній конфігурації (за відсутності завад) (Becker, 1985; Neubauer et al., 1995). Важливими технологічними удосконаленнями стали автоматична реєстрація даних у русі (збільшення просторової роздільної здатності при режимі реєстрації 10 замірів за секунду означає, що при спокійному крокуванні оператора фізичні точки спостережень розташовуються через кожні

12 см (Becker, 1985)), а також використання спеціальних картів (возиків) для переміщення приладів.

Найбільш яскраві роботи команди Х. Бекера – це картування неолітичних пам'яток, таких як рондели (як, наприклад, Schmiedorf та Kothingeichendorf) і залишки довгих жител у Балдінгені, реконструкція римського табору Макбрайт, де за 1986–1991 рр. досліджень було відзнято площу близько 25 га.

Безсумнівно, бурхливий розвиток археологічної геофізики був би неможливий без належної підготовки спеціалістів у закладах освіти. Освітня спеціалізація з археологічної геофізики була відкрита в університетах Бредфорда, Дарнема та Глазго, де геофізичні дослідження вчать сприймати як компоненту цілісного археологічного дослідження і на аналітичній стадії проектів, і на етапі синтезу й узагальнення інформації. Обізнаний фахівець може адаптувати та змінювати методологію дослідження з метою досягнення кращих результатів у конкретних умовах. Як показує практика, методологічні рішення, запропоновані геофізиками, необізнаними з археологічним контекстом, часто виявляються неоптимальними, а результати – незрозумілими або недостатньо інформативними для археологів. Це змушує деяких археологів насторожено ставитися до геофізичних методів і, на жаль, призводить до дискредитації геофізики у фаховій археологічній спільноті.

У 1995 р. були складені методичні рекомендації з геофізичних досліджень при археологічній експертизі (*English Heritage, 1995*), покликані допомогти досягти стандартизації методів прикладної геофізики в археології.

Принциповою зміною в методології магнітних вимірювань, що відбулася у 1990-х рр., стало розроблення мультисенсорних мобільних систем, які транспортувалися на спеціальному карті або переносилися оператором і дозволяли реєструвати магнітне поле за один прохід оператора одночасно уздовж кількох профілів. Ідея використання кількох датчиків одночасно виникла у зв'язку із необхідністю збільшити швидкість польових досліджень. Зокрема, мюнхенська група, очолювана Х. Беккером, тестувала мультисенсорну технологію із цезієвими магнітометрами в античній Трої. Вимірювання з ферозондовим градієнтметром продемонстрували ефективність магнітного методу для ідентифікації римського міста (Троя-Х), але залишки, які належать до більш ранніх фаз існування міста, простежити не вдалося. Вимірювання цезієвим магнітометром Scintrex із роздільною здатністю 0,1 нТл були виконані Х. Беккером та Й. Фасбіндером з метою картування більш глибоких археологічних верств. Вони справді надали можливість вивчити планування міста Троя-VI доби пізньої бронзи за магнітною картою, що охоплює площу 18 га. Сенсачіна інформація про реконструкцію планування Гомерової Трої привернула увагу Р. Павліка, конструктора з компанії "Picodas", який запропонував створити прилад з роздільною здатністю 1 пікотесла, що і було зроблено. CS2/MEP720 (Scintrex/Picodas) стала найбільш чутливою системою, що використовувалась в археології (Becker, 1995). Система була змонтована на карті, що обмежувало її використання місцями, де цей колісний карт міг проїхати.

Наступною була побудована система Smartmag SM4G (Scintrex), яка працювала в конфігурації градієнтметра і змонтована на дерев'яній рамі, датчики були розташовані на відстані 0,5 м один від одного. Маючи роздільну здатність 0,01 нТл, ці датчики були менш чутливі, ніж у системі CS2/MEP720. Х. Бекер та Й. Фасбіндер виконали десятки знімків із цієї системою поза

межами Німеччини, в рамках кооперації з різними археологічними установами. Серед найбільш видатних проектів – картування столиці Єгипту епохи Рамзесидів за Нового царства Квантір у дельті Східного Нілу, дослідження планування елліністичного району в Пальмірі (Сирія), знімання на скіфських поселеннях та курганах у Сибіру. Дослідження, проведені на городищі Чіча (доба бронзи – раннього залізного віку), що в Барабинському лісостепу, стали класичним прикладом сучасних можливостей магнітометричного методу і охоче цитуються авторами оглядових монографій з магнетизму (напр. *Evans & Heller, 2003*). Геофізичне мікромагнітне знімання виконано на території в 58 800 кв. м (5,88 га). Як зазначають самі автори, "результати геофізичних досліджень перевершили всі сподівання: на орному полі були виявлені нові системи укріплень, житлових і виробничих майданчиків, які, без сумніву, становлять єдиний комплекс із рельєфно вираженим городищем і перевершують його за площею не менше ніж у п'ять разів" (Becker & Fassbinder, 1999).

Аби ще зменшити час на польові роботи, Х. Бекер установив усі чотири цезієві сенсори градієнтметра Smartmag на одному рівні на відстані 0,5 м один від одного. Цю систему він назвав *магнітосканером* і за його допомогою виконав кілька визначних проектів в Італії, напр. Остія (де виявлено ранньохристиянську базиліку), і в Баварії, напр. Рюффенхофен (реконструкція повного плану римського укріплення). В останньому випадку швидкість вимірювань мала важливе значення з огляду на те, що пам'ятка була доступна для дослідження протягом коротких періодів між сільськогосподарськими роботами. Однак система із чотирма датчиками не знайшла такого широкого застосування, як магнітометр із двома датчиками, який і зараз використовується групою Й. Фасбіндера.

Австрійці також активно тестували можливості систем із датчиками високої роздільної здатності в різних конфігураціях. Спільними зусиллями академічних дослідників і приватної компанії (Archeo Prospections) була створена група, яка активно займалася розвідкою на пам'ятках, одночасно вдосконалюючи способи візуалізації результатів та їх археологічну інтерпретацію. Їхнім полігоном став Карнунтум, римське містечко поблизу Відня (Neubauer & Eder-Hinterleitner, 1997). Дослідження в різних регіонах Австрії привели до відкриття і картографування десятків пам'яток неоліту із характерними кільцевими ровами (Neubauer & Melichar, 2010).

Окрім цезієвих магнітометрів, великої популярності набули ферозондові градієнтметри, головним чином через їхню відносну дешевизну та легкість у використанні (Bartington & Chapman, 2004; Gaffney et al., 2000).

У 1990-х рр. німецька компанія "Förster" розробила ферозондовий градієнтметр із багатьма датчиками, який був впроваджений до археологічної практики колективом Інституту наук про Землю Університету Кіля у 1992–94 рр. (Stümpel, 1995). Ця система не постала з археологічного досвіду (як це було у випадку із цезієвими системами), а була первинно розроблена для військових потреб, тобто передусім для пошуку набоїв, які не розірвалися.

Система з п'ятьма ферозондовими датчиками, встановленими на рамі, що переносилася двома людьми, була використана для складання карти хетського міста Саріса в Туреччині (Trinks, Stümpel, Lorra, 1999). За допомогою вдосконаленого варіанта системи, встановленого на візку, який тягнув мінітрактор, була повністю закартована територія (65 га) грецької колонії Селінус на сході Сицилії.

Подібні мультисенсорні системи використовувались і на пам'ятках України, про що буде сказано нижче.

У 2005 р. в Інституті фотонних технологій ім. Лейбніца в Йені (Німеччина) була побудована принципово нова система для високоточної магнітної розвідки на базі СКВІД-датчиків (від англ. SQUID, Superconducting Quantum Interference Device – "надпровідний квантовий інтерферометр") (Stolz et al., 2004). СКВІД-магнітометри володіють рекордно високою чутливістю 1 фемтотесла. Ця система розроблена для широкомасштабного сканування місцевості, подібно до ферозондових і цезієвих систем. Щоб зробити СКВІД-сенсори придатними для геофізичного застосування, розробникам довелося розв'язати кілька серйозних проблем. Основна складність полягала в постійній наявності магнітного поля Землі, яке в 109 разів сильніше, ніж поріг чутливості SQUID-магнітометра. Таким чином, лінійний рух у земному магнітному полі векторних датчиків, таких як SQUID або ферозондові магнітометри, спричиняє отримання сигналів, які містять переважно шуми від невеликих нахилів або обертань датчиків. Єдиний вихід – реєструвати просторову похідну магнітного поля в одному напрямку в конфігурації градієнтметра замість самої компоненти поля. База градієнтметра, тобто відстань між двома квадратними петлями надпровідних антен, становить лише 6 см, роздільна здатність – 16 фТл/см. Градієнтметр змонтований всередині кріостата, де постійно підтримується температура нижче 9,2 К, необхідна для функціонування СКВІДів. Система була вперше випробувана в пустелі Наска в Перу, де вона продемонструвала археологічну інформативність, не гіршу за цезієві магнітометри (Linzen et al., 2009), але говорити про перспективу її широкого впровадження в археологічну практику зарано через високу собівартість досліджень.

**Методи опору.** З 50-х рр. XX ст. постійно зростали обсяги застосування і продовжувався методичний розвиток методів опору, які стали надзвичайно популярними при дослідженні археологічних пам'яток і картуванні похованих старожитностей. Успіх методів опору забезпечується значною різницею питомого електричного опору між такими структурами, як стіни, дороги, будівлі, канали, і ґрунтом, у якому вони поховані. Найбільш уживаними в археології стали конфігурації чотириелектродних установок Веннера та Шлюмберже. Переваги і недоліки різних установок широко обговорювались. Наприклад, головною вадою установки Шлюмберже визнано значну залежність результатів від орієнтації вимірювальної лінії відносно об'єкта, оскільки структури, паралельні орієнтації установки, погано розпізнавались.

При площинних вимірюваннях найбільшої популярності набула чотириелектродна установка (Clark, 1990) для досліджень методами опору та зближених електродів. Практична реалізація такої конфігурації дуже проста: по пікетах профілю переміщують два електроди (один живлячий та один приймальний), тоді як два інші залишають нерухомими на близькій відстані один до одного, але водночас далеко від полігону, який обстежується. Дані такого обстеження легко інтерпретувати, отже, метод був успішно використаний при картуванні похованих споруд і об'єктів на різних археологічних пам'ятках і продовжує широко застосовуватись.

У 1990-х рр. значним кроком на шляху до підвищення археологічної інформативності електричних методів стала адаптація нової технології томографії електричного опору (ТЕО, англ. ERT – electrical resistivity tomography) до археологічних потреб (Mol, Preston,

2010). Цей метод також добре зарекомендував себе при розв'язанні гідрогеологічних, геологічних, інженерних та екологічних завдань.

При виборі типу установки для роботи методом електротомографії ключовими характеристиками є глибинність, роздільна здатність і завадостійкість. Тому з'явилася серія робіт, присвячених аналізу типів установок і критеріїв вибору оптимальної конфігурації, часто на основі даних математичного моделювання (Loke, 2009; Zhou & Dahlin, 2003).

Вперше метод томографії електричного опору був використаний для візуалізації археологічних споруд під час експериментальних досліджень римського міста Веруламій у Великобританії (Noel & Xu, 1991). В археологічній практиці електрична томографія служила переважно для доповнення і поліпшення інформаційного контексту, отриманого за допомогою інших геофізичних методів. ТЕО ефективно застосовується для заходження стін, порожнин та інших структур на різних глибинах (Papadopoulos et al., 2006; Drahor et al., 2008).

Розвиток технологій автоматизації та мультиплексації вимірювань за допомогою установок різної конфігурації посприяв можливості отримання великої кількості польових даних за обмежений час. Крім того, поява швидких комп'ютерів стимулювала розроблення автоматизованих алгоритмів інверсії позірної опору, які дозволяють побудувати геоелектричні розрізи за експериментальними даними. Популярним методом інтерпретації даних томографії електричного опору стала гладкообмежена (або блокова) інверсія (the smoothness constraint inversion) (Constable et al., 1987). Вона створює спрощену модель підповерхневого розподілу питомого опору, яка є розумним відображенням геологічного розрізу. У результаті використання алгоритму гладкообмеженої інверсії отримують найбільш стійкий розподіл питомого опору. Така модель є хорошим стартовим наближенням для подальшої інтерпретації. Блокову інверсію рекомендується використовувати в більшості випадків, особливо за відсутності апріорної інформації про геоелектричний розріз. У літературі описано кілька двовимірних алгоритмів гладкообмеженої інверсії даних ТЕО (Sasaki, 1992; Loke & Barker, 1995). Крім того, було представлено кілька алгоритмів для реалізації інверсії даних ТЕО у трьох вимірах.

Для виконання тривимірних досліджень методом ТЕО з метою отримання 3D-моделі досліджуваного середовища використовують різні конфігурації електродів, можливі в межах мережі з конкретною геометрією (Berge & Drahor, 2011; Fischanger et al., 2019).

Утім, незважаючи на розробку вдосконаленого устаткування та методів тривимірної інтерпретації, загальна геофізична практика все ще спирається переважно на двовимірні підходи як при польових вимірюваннях, так і при інтерпретації даних. Дані, отримані по мережі профілів, зазвичай інтерпретуються за допомогою двовимірних алгоритмів, а результати комбінуються пізніше для створення квазітривимірних (x, y, z) візуалізацій.

Для подолання основних обмежень установок із фіксованою конфігурацією були розроблені мобільні системи картування електричного опору (Panissod et al., 1998; Papadopoulos et al., 2006; Dabas, 2008). Зокрема, мобільні мультиполярні багатоелектродні системи дозволяють виконувати дослідження методом електропрофілювання опору в русі, що суттєво скорочує час на збирання польової інформації. Одним із перших технологічних рішень стала прямокутна установка з електродами, вмонтованими в колеса, яка дозволяла

вимірювати позірний опір ґрунту на постійній глибині. Глибину дослідження можна було збільшити за рахунок зміни відстані між колесами. Пізніше були розроблені й описані інші варіанти мультиполярних мобільних систем. Зокрема, К. Паніссод із колегами (*Panissod et al., 1998*) запропонував конфігурацію на мобільній платформі, яка складалася із восьми електродів, розміщених на V-подібній рамі (так звана установка "Vol-de-canards", тобто "пташиний клин" – фр.). Це обладнання використовувалося для малоглибинних досліджень (до 3 м). Означена мультиполярна конфігурація забезпечує отримання тривимірної моделі підземного простору зі значною економією часу на збирання даних порівняно з мобільною установкою "pole-pole" в однакових умовах (*Panissod et al., 1998*). Подальші дослідження (*Dabas, 2008*) були присвячені вдосконаленню мультиполярних систем з метою зменшення впливу шуму на вихідні дані. Зокрема, М. Дабас розробив обладнання, відоме як "автоматизована установка електропрофілювання" (Automated Resistivity Profiling – ARP). Прилад складається із поперечного живлячого диполя і трьох поперечних приймаючих диполів, встановлених на зростаючій відстані від живлячого. Ця конфігурація призначена для одночасних вимірювань видимого опору на трьох різних глибинах. Н. Пападопулос зі співавторами (*Papadopoulos et al., 2009*) описав розв'язання оберненої задачі для даних позірної опору, отриманих за допомогою системи ARP, з метою отримання надійної числової моделі, здатної описати просторовий розподіл електричного опору у приповерхневому шарі ґрунту досліджуваної області. Описаний авторами процес інверсії заснований на методі найменших квадратів і використовує гладкообмежений алгоритм, який враховує нестійкість моделі та неєдність розв'язку.

Розроблення мобільного устаткування дозволила збільшити охоплення території вимірюваннями, а також різко скоротила час, необхідний для проведення досліджень. Доступними стали дослідження електричного опору великих площ археологічних пам'яток і ландшафтів. Наприклад, у 2013–2015 рр. на археологічній пам'ятці Мон-Прама в Сардинії (Італія) вимірюваннями позірної опору високої детальності було покрито 22 800 м<sup>2</sup> (*Piroddi et al., 2020*). Дані про електричний опір отримували в реальному часі із сантиметровою горизонтальною точністю завдяки синхронізації геофізичних вимірювань із даними диференціальної системи позиціонування GPS. Додатковою перевагою стала можливість спільного аналізу тривимірної геофізичної інформації та детальної цифрової моделі місцевості, що сприяло точному визначенню ділянок, найбільш перспективних для майбутніх археологічних досліджень.

**Георадарний метод.** Зацікавленість фахівців у використанні методу георадіолокації, або георадарного методу (англ. GPR – ground-penetrating radar), не зростала стабільно із часом. Починаючи зі стадії лабораторних розробок у 1970-х рр., метод одразу привернув до себе увагу геофізиків-дослідників приповерхневої частини геологічного розрізу, яка потім послабшала приблизно на 10 років. Згодом, у середині 1980-х рр., у зв'язку з бурхливим розвитком електроніки, обчислювальної мікропроцесорної техніки і одночасним зростанням потреб в інженерній розвідці, інтерес до георадарного методу підвищується, але, наштовхнувшись на відсутність задовільних систем оброблення хвильової інформації, знову згасає (*Владов и Старовойтов, 2004*).

Перші застосування георадара в археології припадають на 1975 р., дослідження були виконані у США.

У наступні десятиліття було опубліковано результати низки успішних впроваджень методу у сприятливих умовах, зокрема американськими та японськими вченими (*Goodman & Nishimura, 1993; Conyers & Goodman, 1997*). Сприятливими умовами дослідники справедливо вважали сухі піщані ґрунти або лід, де не спостерігається швидкого затухання електромагнітного сигналу і є можливість отримати радарограму задовільної роздільної здатності щодо археологічних об'єктів.

У європейській археології перші експерименти з використання аналогової георадарної системи для пошуків похованих об'єктів відбулися у 1980 р. у південній Швеції (*Viberg, Trinks, & Lidén, 2011*) та на Кіпрі (*Fischer, 1980 a*). Результати останнього знімання були пізніше підтверджені археологічними розкопками, під час яких виявилося, що найбільш яскраві відбиття на радарограмах відповідали залишкам давніх стін.

Із 1990-х рр. інтерес до використання GPR перебуває у стадії постійного бурхливого зростання. Крім георадарів широкого спектра використання, випускається і спеціалізована апаратура для вузьких цілей, зокрема для роботи на археологічних пам'ятках. Перші георадарні системи були великими за розмірами, громіздкими конструкціями, приймач і передавач були з'єднані кабелями із принтером, який друкував радарограми на термопапері. Переваги методу для археологічної розвідки стали очевидні з появою систем цифрового запису вимірювань і програмного забезпечення для оброблення хвильових даних на основі алгоритмів, запозичених із сейсморозвідки, а також із початком застосування моделювання георадарних даних для поліпшення розуміння спостережених хвильових полів (*Neubauer et al., 2002*).

За останні 20 років кількість прикладів успішного застосування георадара в археології істотно збільшилась, про що, зокрема, свідчить зростаюче значення археологічних секцій таких спеціалізованих форумів, як The International Conferences on GPR та EuroGPR.

До порівняно недавнього часу бракувало досліджень ефективності георадарних технологій на глинистих і перезволожених ґрунтах. Перезволоження зменшує швидкість передавання радіохвиль, випромінюваних георадаром, і отже, зменшує ефективну глибину дослідження. Однак, оскільки більшість археологічних решток лежать відносно неглибоко, то потенційної глибини георадара цілком може бути достатньо для виконання успішного обстеження. Це не стосується високопровідних ґрунтів, насичених вологою зі значним вмістом мінеральних речовин (напр., певні глинисті та сольові відклади). У цьому випадку сигнал розсіюється, створюючи струм у ґрунті, а не повертаючись до приймальної антени, що призводить до часткової або повної втрати інформації. Зокрема, поширеність глинистих ґрунтів на Британських островах у поєднанні з неповним розумінням фізичних обмежень георадарного методу часто призводили до незадовільного результату (*McCann, 1995*). Деякі дослідження були присвячені аналізу причин низької інформативності георадарного методу в умовах перезволоження (напр. *Meats & Tite, 1995*). Серед ранніх досліджень є приклади, коли начебто успішне знімання згодом викликало обґрунтовані методологічні сумніви (*McCann, 1995*) і не отримало археологічного підтвердження.

Хоча георадіолокація часто вважається невідповідним методом для водно-болотних середовищ, саме вона була успішно застосована для виявлення дерев'яних шляхів на данських торфовищах, вимірювання товщини торфу у Швеції та картування водно-болотних угідь у Нідерландах. Доведено, що торфи з низьким

вмістом мінеральних речовин ідеально підходять для георадіолокаційного знімання, навіть в умовах заболочення (Clarke et al., 1999).

Поширеною практикою стало використання георадарів при дослідженні архітектурних споруд (Conyers, 2017). В архітектурно-археологічних дослідженнях георадар успішно застосовується при вивченні елементів конструкцій, зон розтріскування і замокання, а також для пошуків і діагностики стану комунікацій і різних підземних конструкцій. На сьогоднішній день існує також багато публікацій, присвячених георадарному скануванню у церквах.

Більшість георадарних досліджень виконувалася у двовимірному (2D) варіанті, однак, ураховуючи те, що археологічні об'єкти часто мають складну тривимірну структуру, дослідники скоро перейшли до побудови тривимірних моделей окремих об'єктів і культурного шару загалом (Gołębowski, 2006).

Технологія георадарних вимірювань розвивалася в напрямі більш повного охоплення тривимірного простору шляхом створення багатосенсорних установок і багаточастотних систем (Dabas, 2008). Вимірювальні системи найновіших конструкцій, інтегровані з диференційними GPS, дозволяють проводити швидкі та ефективні знімання в русі з горизонтальним розрізненням від дециметра до сантиметра (Van De Vijver et al., 2015).

В останні роки до археологічної практики активно запроваджуються багатоканальні георадіолокаційні системи. Вони використовуються як для одночасного знімання кількох паралельних профілів, так і в "багато-розносний" (multi-offset, multi-static) конфігурації, коли сигнал від одного передавача реєструється кількома приймачами, розташованими на різних відстанях (Leckebusch, 2003; Trinks et al., 2018).

Технологія multi-offset дозволяє поліпшити якість візуалізації підповерхневих цілей за рахунок підвищення роздільної здатності, однак виробництво спеціалізованих вимірювальних систем і відповідного програмного забезпечення вимагає затрат, несумісних із вимогами комерційного сектору, і цей фактор поки що стримує розвиток означеної технології. Опубліковані успішні знімання археологічних пам'яток із використанням однієї пари передавач-приймач (передавач встановлювався на визначеній точці мережі спостережень, а приймач рухався в межах заздалегідь визначеної відстані) (Booth et al., 2008).

Виробники георадарного обладнання почали випускали дво- і чотириканальні системи, що дозволяють паралельно використовувати кілька пар антен. Такі системи працювали лише в пішохідному варіанті, за невеликих швидкостей руху, але дуже швидко на зміну їм прийшли багатоканальні системи з високою швидкістю, які одразу ж почали використовуватись в археології. Ефективність 16-канальної системи з робочою частотою 400 MHz MALA Imaging Radar Array (MIRA) у 2009 р. була переконливо продемонстрована при дослідженні форуму римського міста Карнунтум, яке з 2002 р. стало традиційним місцем тестування нових георадарних технологій. За даними, зібраними MIRA та обробленими MALA Geoscience, вперше виявлені акуратно розташовані паралельні ряди похованих цегляних стовпів римської опалювальної системи – гіпокаусту в одній із будівель Форуму. Цей гіпокауст вже був передбачений В. Нойбауером на основі аналізу магнітних даних, які свідчили про наявність тут конструкцій із сильною термозалишковою намагніченістю (Neubauer et al., 2002).

Іншою популярною системою є Sensors & Software SPIDAR, яка складається із шести 500 МГц Pulse Ekko Pro антенних блоків (Gabler et al., 2019). Обидві системи

використовуються в моторизованому варіанті на тракторах і квадроциклах.

Розроблення багатоканальних систем ведеться багатьма фірмами, більшість із них не втрималися на ринку. Наприклад, 14-канальна система з антен 400 МГц, яка отримала назву Terravision, розроблена у 2002 р. компанією Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI), проходила тестування на археологічних об'єктах в Італії, але з 2008 р. знята з виробництва (Trinks et al., 2018).

Величезні масиви георадарних даних, отримані за допомогою інноваційних багатоканальних антенних систем з нерегулярною геометрією, на відміну від традиційних одноканальних вимірювань, що проводяться вручну зі збереженням постійного інтервалу між профілями, вимагають нових підходів до оброблення даних. Кількість даних стала настільки великою, що традиційні способи перевірки якості знімань, такі як перегляд окремих радарограм, стали надмірно трудомісткими. Крім того, з'явилися нові джерела похибок, які можуть бути спричинені різними несправностями вимірювального обладнання, неточностями в організації мережі збирання даних, неврахованими часовими затримками між георадарним записом і геопозиціонуванням, зовнішніми високочастотними перешкодами тощо.

Подальший розвиток георадарного методу в археології може бути пов'язаний із вивченням інформативності низько- (нижче 200 МГц) та високочастотних (вище 800 МГц) антен, а також потенційних можливостей багаточастотних антен з якомога ширшим спектром робочих частот (Sala & Linford, 2012). Поліпшення інтерпретації георадарних аномалій може бути досягнуто в контексті моделювання комплексної стратиграфії пам'яток (Warren, Giannopoulos, & Giannakis, 2016). При роботі з надзвичайно щільними масивами георадарних даних можливі нові підходи до 3D-рендерингу простору як до більш реалістичної візуалізації даних.

Комплексування ефективних широкомасштабних і детальних георадарних даних із результатами інших приповерхневих геофізичних методів, таких як високоточна детальна магнітометрія, лежить в основі ретельного вивчення і аналізу археологічного ландшафту.

#### Експерименти і досягнення у колишньому СРСР.

У колишньому СРСР розвиток археологічної геофізики почався у 1960-х рр., коли були проведені успішні експериментальні дослідження із застосування магніто- і електророзвідки на низці археологічних пам'яток.

У 1962 р. Лабораторія археологічної технології Ленінградського відділення Інституту археології (ЛВІА) вперше провела дослідні роботи з вивчення ефективності геофізичних методів розвідки в археології. Була організована експедиція для випробування деяких методів розвідки на неолітичній стоянці В'юн у Ленінградській області (Франтов, 1963). Результат виявився позитивним. Магнітне знімання проводилося за допомогою астатичного магнітометра М-2, який вимірює приріст вертикальної складової геомагнітного поля  $\Delta Z$ . Виміри із цим магнітометром можуть бути виконані з похибкою менше  $\pm 2$  гамм ( $\pm 2$  нТл). Знімання виконане по профілях, що перетинали стоянку. Поза межами стоянки у спокійному магнітному полі розміщався інший прилад для спостереження варіацій магнітного поля. Виявилось, що в районі стоянки, помітному по знахідках кераміки, каміння з вогнищ і культурного шару, спостерігалися підвищені значення  $\Delta Z$ .

У 1960 р. завод "Геологоразведка" (Ленінград, СРСР) виготовив першу серію ферозондових магнітометрів М-17, із застосуванням яких у 1963 р. була здійснена

спроба вивчення планування середньовічного городища Ізяслава у Шепетівському районі Хмельницької області. На площі укріпленої частини городища знімання проводилося по мережі 1 x 1 м магнітометром М-17, а варіації геомагнітного поля вимірювалися магнітометром М-2. Єдиним об'єктом, який вдалося виділити за допомогою ферозондового магнітометра М-17, виявився розвал гончарного горна, який створив аномалію 110 нТл завдяки сильно обпаленій червоній глині. Поруч за магнітними аномаліями були виявлені розвали ще двох менших пічок, а також ще один потужний гончарний горн. Ця робота, опублікована автором у 1965 р. (*Шилик, 1965*) і описана у книзі "Геофізика в археології", опублікованій у 1966 р. (*Франтов, Пинкевич, 1966*), вважається першою спробою застосування магнітометрії в археології в СРСР. У наступні роки група працювала переважно на середньовічних пам'ятках Криму (*Шилик, 1968, 1974*), застосовуючи, крім магніторозвідки, електричні методи.

У 1965 р. Інститут археології АН СРСР анонсує створення диференціального магнітометра направленої дії МНД-1, а пізніше МНД-2 та МНД-3, зробленого на базі існуючого в СРСР градієнтометра, який використовувався у далекій від археології сфері (*Грошевой і др., 1966*). Прилад працював за принципом вимірювання двох магнітних потоків під час руху.

Цей прилад пройшов успішні, на думку авторів, випробування на могильниках біля городищ Кепи та Фаногорія на Тамані, на Звенигородському городищі та інших пам'ятках, де за його допомогою були виявлені склепи, ґрунтові поховання, фундаменти давніх споруд, печі, скупчення кераміки (*Грошевой і др., 1967; Дудкин, 1970*). Автори також повідомляли про успішні порівняльні випробування диференціального магнітометра МНД із протонним магнітометром Р-5 НИИЗМИРАН. Однак подальшого розвитку в археології ця технологія не отримала.

В Україні перші магнітометричні дослідження древніх поселень провели В. П. Дудкін, Г. Ф. Загній, О. М. Русаков у 60-х рр. XX століття. Ці дослідники сформуливали початкові положення методики магнітного знімання пам'яток трипільської культури і визначили загальні підходи до археологічної інтерпретації магнітних аномалій (*Кошелев, 2005 а, 2005 б*).

Магнітна розвідка з магнітометром МНД-3 була проведена у 1966 р. на трипільських, ранньослов'янських та давньоруських поселеннях (*Даниленко і др., 1967*), а у 1967 р. група Г. Ф. Загнія здійснила геофізичну розвідку за допомогою протонного магнітометра М-20 на багаточисельній пам'ятці Чапаївка і трипільському поселенні Старі Безрадиці на Київщині (*Загний і др., 1971*). У 1969–1970 рр. геофізична розвідка була успішно застосована для пошуків горнів на поселенні гончарів VII ст. біля с. Любимівка у Дніпропетровській області. Вивчення матеріалів розкопок минулих років, а також результатів експериментальних геофізичних досліджень, проведених Г. Ф. Загнієм на одній із локальних ділянок за допомогою протонного магнітометра М-20, дозволило зробити висновок про можливість виділення шуканих об'єктів магнітометричним методом. Такий висновок обґрунтований насамперед тим, що залишки гончарних горнів складаються із великих скупчень сильно обпаленої глини (до 1000 кг) і, згідно з розрахунками, утворюють значні аномалії магнітного поля (до кількох сотень нТл). Це добре узгоджувалося з даними експериментальних досліджень і дозволяло використовувати для пошуків горнів і масивних обпалених трипільських площадок не тільки дефіцитні на той час протонні магнітометри, але й менш чутливі, проте поширені оптико-механічні

магнітометри типу М-27 (НПО "Рудгеофизика", Москва) (*Дудкин, 1978*). Із цим приладом під керівництвом В. П. Дудкіна були розпочаті планомірні дослідження трипільських пам'яток і за 30 років діяльності підготовлені магнітні плани майже 50 різночасових поселень.

До видатних досягнень магнітної розвідки минулих років слід віднести результати досліджень найбільших із відомих поселень ("протоміст") трипільської культури в Черкаській області – Майданецького (площа зйомки 180 га) і Таллянків (230 га).

Поселення Майданецьке було раніше відоме за результатами археологічних вишукувань, але сприймалося як кілька близько розташованих поселень невеликих розмірів. Гіпотеза про існування єдиного поселення-гіганта трипільської культури була висунута К. В. Шишкіним на підставі дешифрування аерофотознімків і доведена засобами магнітної розвідки (*Кошелев, 2005 а*). Факт існування дуже великих поселень на Черкащині в корені змінив уявлення про трипільську цивілізацію, яка за масштабами і рівнем розвитку виявилася подібною до широковідомих перших землеробських цивілізацій на території Месопотамії, Близького Сходу і Східного Середземномор'я.

За результатами магнітних знімань із використанням доступних на той час засобів оброблення інформації вручну В. П. Дудкіним були побудовані перші варіанти планів поселень. Ці плани були, можливо, недостатньо докладними і не супроводжувалися побудовою структурних схем забудови поселень, але, тим не менш, давали цінну інформацію про розташування житла на площі пам'яток і деяке уявлення про загальну структуру поселень. Матеріали цих досліджень опубліковані в низці робіт (*Шмаглій та ін., 1973; Дудкин та Відейко, 1992 та ін.*).

У цей самий період В. П. Дудкіним та Г. Ф. Загнієм проводився відбір зразків з археологічних об'єктів для лабораторних визначень їхніх магнітних характеристик. Хоча отримані дані не були статистично оброблені, але й у такому вигляді вони дозволяли наближено оцінювати наявність сприятливих передумов для постановки магнітних знімань і застосовувались для розпізнавання достатньо інтенсивних магнітних аномалій у процесі їхньої первинної археологічної інтерпретації. Повною мірою використання цих фактичних даних стало можливим тільки на наступному етапі розроблення теорії археологічної магніторозвідки, а саме після проведення повноцінного статистичного аналізу (*Кошелев, 2005*).

У радянський період на території України успішно застосовувались також інші геофізичні методи. Зокрема, у роботі І. Антонової та співавторів (*Антонова і др., 1979*) описаний досвід застосування методів опору (електропрофілювання) і сейсморозвідки для знаходження склепів на некрополі Херсонесу II–VI ст. н. е. Автори зазначають, що електророзвідка необхідна на першому етапі досліджень для картування уступів терас, похованих під пухкими відкладами. Самі ж склепи проявляються у динамічних та кінематичних особливостях поля повздовжніх сейсмічних хвиль.

**Поточний стан досліджень в Україні.** Поштовхом до поновлення археолого-геофізичних досліджень вже в незалежній Україні став масовий перехід в кінці 1980-х – на початку 1990-х рр. геологічної і археологічної магнітометрії до використання протонних магнітометрів ММП-203 ("Рудгеофизика", Ленінград). Цей пішохідний магнітометр призначений для вимірювання модуля магнітної індукції. Магнітометр характеризується відносно високою чутливістю (похибка становить  $\pm 1$  нТл), великим діапазоном вимірювань (20–100 мкТл), відносно високою

швидкодією (тривалість одного виміру до 3 с). За допомогою цих приладів у 1992–95 рр. групою В. П. Дудкіна були відзняті плани двох десятків трипільських поселень, включаючи такі великі, як Глибочок (100 га), Ольховець (100 га), Ятранівка (70 га). Точність цих знімків 2,2–2,8 нТл, як і детальність 3 x 3 м, 4 x 4 м, є недостатніми для обґрунтованих висновків щодо планування і демографії давніх поселень, що визнають самі автори, однак саме ці напрацювання стали поштовхом для високоточних і ультрадетальних вимірювань на пам'ятках трипільської культури у 2010-х рр., здійснених англійськими та німецькими геофізиками (*Chapman et al., 2014; Rassman et al., 2014*).

Загальна площа археологічних пам'яток, обстежена групою В. П. Дудкіна, становила близько 1200 га на території від Пруту до Дніпра, зафіксовано тисячі аномалій від споруд і господарських ям. Дослідниками набутий позитивний досвід магнітних вимірювань не тільки на поселеннях трипільської культури, а й на пам'ятках ранньослов'янського і доскіфського часів (*Дудкін, Відейко, 1992; Кошелев, 2005*).

У 2005 р. І. М. Кошелев видає методичну монографію, у якій викладені фізичні основи магнітометричного методу археологічних досліджень (*Кошелев, 2005 а*). На прикладах стародавніх пам'яток України описані структурні, геометричні та фізичні особливості археологічних об'єктів. Наведено результати статистичного аналізу магнітних властивостей їхнього речовинного складу та фізико-археологічне обґрунтування методу. Проведено порівняння магнітометрії з іншими методами геофізичної розвідки і аналіз можливостей їх включення до комплексу досліджень археологічних пам'яток. Значну увагу приділено створенню, розрахунку і використанню фізико-археологічних моделей. Розглянуто основні положення методики і техніки польових досліджень, наведені необхідні відомості про вимірювальну апаратуру. Проаналізовано різні методи оброблення і перетворень вихідної магнітометричної інформації з найбільш простих, але здатних забезпечити достатньо високу якість, надійність, повноту і результативність археологічного тлумачення магнітометричних даних.

І. М. Кошелев переобробив і узагальнив дані знімків В. П. Дудкіна на трипільських поселеннях. Застосування розробленої автором більш досконалої системи комп'ютерного оброблення та інтерпретації вихідних магнітометричних даних забезпечило можливість побудови значно повніших і детальніших планів поселень (*Кошелев, 2005б*).

На початку 2000-х рр. у сфері археологічної геофізики починає працювати група фахівців з Інституту геофізики НАН України під керівництвом М. І. Орлюка. У 2004 р. група здійснила магнітне знімання на Хотівському городищі скіфської доби. Магнітометричні спостереження виконані протонними магнітометрами МИНИМАГ ("Геологоразведка", РФ) з роздільною здатністю датчиків 0,1 нТл на площі 6,1 га. Знімання виконане в межах полігонів розмірами 50 × 50 м. Крок по профілю становив 1 м, відстань між профілями – 1 м. Загальна площа знімання становила 67500 м<sup>2</sup>. Розкопками було зафіксовано 12 аномалій, з яких чотири відповідали археологічним об'єктам (завали глиняної обмазки і кам'яні вимостки) (*Ивакин и др., 2005*). Це знімання дозволило археологам зробити важливі висновки щодо функції городища і його заселеності, зокрема такі, що більша частина території городища не була забудована, залишалася вільною.

Група М. І. Орлюка спільно з компанією "Eastern Atlas" у 2002–2005 рр. проводила археолого-геофізичні

дослідження на Більському городищі скіфської доби в межах роботи спільної українсько-німецької експедиції (*Zollner et al., 2007; Орлюк и др., 2016*). Під час цих робіт застосовувався магнітний градієнтометр на основі ферозондів Ferrex 4.021 з точністю визначення вертикального градієнта магнітного поля  $\pm 0,5$  нТл/м. Робочий варіант приладу складається із п'яти зондів, закріплених на відстані 40 см один від одного. У результаті досліджень на Західному Більську виявлена велика кількість залишків селітроварних печей XVII–XVIII ст., що розташовані вздовж валів городища, описана структура кількох скіфських курганів поруч із городищем.

У 2010-х рр. в Україні починають працювати дві потужні закордонні наукові групи, зацікавлені у вивченні трипільських пам'яток. Це команда Університету Дарема (Великобританія) під керівництвом Дж. Чепмана, а також німецька група, у складі якої геофізичні дослідження виконували фахівці з Університету Кіля.

Впровадження магнітного картування отримало назву "друга методологічна революція у вивченні протоісторії (megasites)" (*Chapman et al., 2014*). Команда з Великобританії здійснила знімання на поселенні Небелівка. Використовувала градієнтометр Bartington Grad 601-2, оснащений двома датчиками. За 38 тижнів роботи була відзнята площа 286 га. Переважна більшість спостережених аномалій належать до обпалених і частково обпалених трипільських площадок, а також заповнених ґрунтом ям та ровів. Важливою складовою оброблення магнітометричних даних було видалення регіонального фону від магнітоактивних порід Українського кристалічного щита. Особлива увага приділялась периферії поселення, оскільки дослідники хотіли бути впевненими, що всі його структури відзняті.

З 2011 р. внаслідок співпраці ІА НАН України, Римсько-Германської комісії, Інституту пре- і протоісторичної археології та Аспірантської школи Кільського Університету ім. Крістіана Альбрехта (Німеччина) було отримано плани для сотень гектарів трипільських поселень Буго-Дніпровського межиріччя, таких як Тальянки, Майданецьке, Доброводи, Аполянська, Петрені (*Rassman et al., 2014*), Тростяничок (*Рудь та ін., 2016*). Для реконструкцій планування поселень застосовано мобільну магнітометричну вимірювальну систему, розроблену для обстеження великих площ – Sensys MAGNETO® MX V3, оснащену вісьмома ферозондовими градієнтометрами FGM650/3, які мають чутливість 0,6 В/мкТл і діапазон вимірювань  $\pm 8000$  нТл. Вимірювання здійснені за системою паралельних профілів, відстань між якими визначається відстанню між зондами – 50 см. Висота знімання, тобто відстань від землі до зондів, становить 20 см. Географічну прив'язку вимірювань здійснено за допомогою системи із двох взаємопов'язаних GPS-приймачів (RTK DGPS Leica GNSS): один служив базовою станцією, а інший був закріплений на вимірювальній системі. Це дало змогу отримати дані з похибкою планової прив'язки  $\pm 1$  см. За середньої швидкості пересування вимірювальної системи 3,6 км/год і частоти запису DGPS у 20 Гц у підсумку отримані геоприв'язані вимірювання на кожні 5 см, тобто мережа знімання мала детальність 50 × 5 см.

Основною метою цих робіт були перевірка й уточнення старих геомагнітних планів і створення нових за допомогою використання сучасного геофізичного обладнання. Завдяки високоточному геомагнітному зніманню на поселеннях вдалося виявити низку невідомих раніше об'єктів, які змінюють наші уявлення про різні аспекти життя трипільського суспільства. Відкрито та розкопано мегаструктури,

горни для обпалу кераміки, рови, ями (Rassman et al., 2014; Champman et al., 2014). Зокрема, на поселенні Таплянки було відзнято 195 га площі, 120 га з яких мають ознаки давньої заселеності. Дослідженнями В. П. Дудкіна було охоплено 140 га, тобто майже вся територія, яку займають трипільські житла, була презнята.

Як можна побачити, видатні пам'ятки археології в Україні продовжують привертати увагу іноземних дослідників. Наприклад, геомагнітне знімання, проведене у 2014 р. німецькими геофізиками (Patzelt et al., 2016) біля західних воріт Ольвії з боку її хори, виявило яскраві аномалії розмірами 2-12 м, пов'язані із житлами-напівземлянками, заглибленими в материковий ґрунт на 1,2 м. Знімання дозволило встановити, що заселена частина хори не підходила безпосередньо до кордонів міста, а відстояла від нього на 100–200 м. Геомагнітні дослідження у передмісті й на терасній частині Ольвії на площі 20 га (Patzelt & Waldhör, 2021) виявили також давній рів, який, очевидно, розмежовував ділянку передмістя та міста протягом ранньоантичного часу. Крім того, керуючись просторовим розповсюдженням магнітних аномалій різних типів, вдалося відмежувати житлову частину міста від некрополя. У центральній частині міста проводилися георадарні знімання з метою пошуку залишків античного театру, про який відомо з епіграфічних джерел (Буйський та ін., 2020).

Магнітні знімання в Криму, виконані за допомогою оверхаузеровських магнітометрів-градієнтометрів GSM19WG виробництва GEM systems Inc. (Онтаріо, Канада), додали багато нової інформації щодо структури поселень, курганів, сільськогосподарського освоєння територій в різні епохи (Smekalova et al., 2005, 2016). Геофізичні дані разом із даними аерофотознімання та дистанційних зондувань Землі стали важливим внеском до археологічної карти Криму.

Із 2005 р. у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка працює археолого-геофізична група під керівництвом К. Бондар. Група проводить дослідження, спрямовані на виявлення археологічних об'єктів, а також дослідно-методичні роботи зі створення і вдосконалення археолого-геофізичних технологій. Проаналізувавши світовий досвід із застосування неруйнівних методів для потреб археології, ми зосередились на розвитку найефективніших технологій для масового вивчення археологічних пам'яток України, збереження і контролю за станом нерухомих об'єктів історико-культурної спадщини. Нашими фахівцями розроблені спеціалізована методика польових магнітометричних досліджень археологічних пам'яток і оригінальне програмне забезпечення для оброблення та інтерпретації даних вимірювань (Бондар та ін., 2019). Створено багатоелектродну електрометричну установку на постійному струмі з максимальною глибинністю 11 м, призначену для дослідження вертикальної структури культурних шарів (Хоменко, Бондар та Попов, 2013). Нами успішно застосовуються георадарні технології в археології (Бондар, Бобровський та Цюпа, 2016; Бондар та ін., 2018; Бондарь и др., 2020).

Наша дослідницька група вивчала різні пам'ятки як в Україні, так і за кордоном. Серед досліджених об'єктів – палеолітичні пам'ятки Закарпаття та околиць Меджибожа у Хмельницькій області, пам'ятка трипільської культури печера Вертеба (Бондар et al., 2021 a), пам'ятки Малополовецького археологічного комплексу (Київська обл.), Більське городище (Полтавська обл.), ранньоскіфські городища Жаботин (Київська обл.), Немирів (Вінницька обл.), Хотів, курганний могильник Катеринівка (Бондар та ін., 2019; Polin, Daragan & Bondar, 2020) та

інші кургани Дніпропетровщини, Полтавщини, Київщини, Ешерське городище античної доби в Абхазії, могильники черняхівської культури Червоне (Київська обл.), Легедзине (Черкаська обл.), Війтенки-1 (Харківська обл.), Комарів-1 (Чернівецька обл.) (Bondar et al., 2022), ранньослов'янське поселення Обухів-2 (Київська обл.), поселення пізньоримського часу Війтенки (Харківська обл.), Комарів (Чернівецька обл.) (Бондар та ін., 2022) та Дмитрівка III (Полтавська обл.), Іллінська церква в Суботіві (Бондарь и др., 2020), заповідники "Софія Київська" та "Києво-Печерська лавра", масові поховання Холокосту на Львівщині, Інкерманські штольні в Севастополі та інші об'єкти Другої світової війни тощо. Наша наукова група бере участь у георхеологічних проєктах, досліджуючи магніостратиграфію, а також палеокліматичні зміни під час голоцену – верхнього плейстоцену на ґрунтах і печерних відкладах.

У співпраці з Інститутом археології НАН України, історико-культурними заповідниками, обласними органами охорони пам'яток нами реалізовані проєкти, які отримали широкий суспільний резонанс, наприклад дослідження місця поховання Б. Хмельницького у Суботіві, локалізація місця Мельгуновського кургану, вивчення масових поховань Другої світової війни тощо. На рис. 1 представлено результат нашого геомагнітного знімання на місці кургану Лита могила (Мельгуновського) у 2018 р., насип якого був відновлений за ініціативою Кропивницької ОДА у 2020 р. після проведення відповідних археологічних досліджень.

**Висновки і перспективи.** Всупереч розповсюдженій думці, що археологічна геофізика виникла і розвивалася шляхом адаптації методологічних підходів і апаратури, раніше застосованої в геології, з ретельного аналізу світового досвіду можна бачити, що найбільш успішні методологічні й технологічні рішення були цілеспрямовано віднайдені для археологічного застосування. Це справедливо, зокрема, щодо розроблення всіх типів найбільш уживаних сьогодні приладів для магнітного знімання в археології – протонних і цезієвих магнітометрів, ферозондових градієнтометрів. Крім того, нові модифікації геофізичних методів, які розвинулися завдяки прогресу цифрових технологій в електроніці (георадарний метод, метод томографії електричного опору тощо), одразу впроваджувалися у практику для археологічних потреб. До адаптації апаратури і методів польових спостережень, прийнятих у геології, вдавалися переважно радянські дослідники.

На сьогодні можна впевнено стверджувати, що найбільш точні й детальні геофізичні знімання з використанням чутливої апаратури виконуються саме на археологічних пам'ятках.

Якщо говорити про перспективи археологічної геофізики у світі, то наразі настав момент, коли рішення про застосування тої чи іншої вартісної геофізичної технології напряму залежить від здатності дослідників передбачити позитивний результат. Це неможливо без детального знання фізичних властивостей ґрунтів і археологічних матеріалів, а також глибокого розуміння природних і антропогенних процесів, які зумовлюють зміни фізико-хімічних параметрів ґрунту. Орієнтованість світових наукових колективів саме на отримання додаткової інформації про ґрунтовий покрив з метою поліпшення археологічної інтерпретації геофізичних даних показує, зокрема, меморандум нині діючого проєкту SAGA COST Action CA17131 "Альянс ґрунтознавства та археологічної геофізики: вихід за межі розвідки" (The Soil Science & Archaeo-Geophysics Alliance: going beyond prospecting) Організації з Європейської Співпраці в Галузі Науки і Техніки.

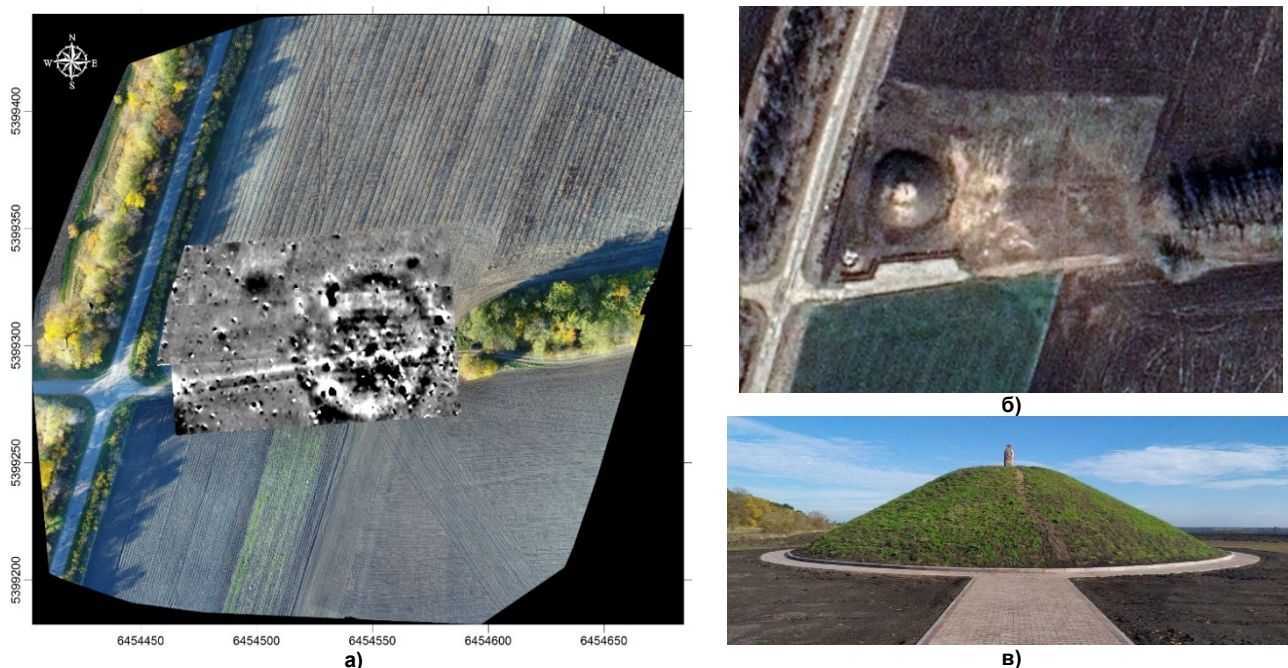


Рис. 1. Курган Лита могила (Мельгуновський). Карта аномалій геомагнітного поля за шкалою відтінків сірого кольору  $\pm 5$  нТл, накладена на ортофотоплан (а); відновлений насип кургану на космоснімку з ресурсу Google (б) і на фото (в)

Що стосується України, то нам належить пройти великий шлях, необхідними кроками якого є впровадження сучасних апаратних рішень гнучких конфігурацій, якими є, наприклад: мультисенсорні цезієві магнітometri-градієнтometri чи багаточастотні георадарні системи, вдосконалення пам'яткоохоронного законодавства, розроблення національного стандарту застосування геофізичних методів в археології та відповідних освітніх програм.

#### Список використаних джерел

- Антонова, І.А., Глазунов, В.В., Гоц, І.А., Шевнин, В.А., Модін, І.Н., Великов, В.В., Уразаєв, Н.І., Тарнопольська, Н.Б., Рыжов, С.Г. (1979). Геолого-геофізическіе исследования на некрополе Херсонеса. *Новое в применении физико-математических методов в археологии*. М.: Наука, 10–19.
- Бондар, К., Бобровський, Т., Цюпа, І. (2016). Вивчення ефективності георадарних досліджень на території Національного заповідника "Софія Київська" для вирішення археологічних завдань. *Геоінформатика*, 4 (60), 75–82.
- Бондар, К.М., Дараган, М.М., Прилуков, В., Полін, С.В., Цюпа, І.В., Діденко, С.В. (2019). Магнітометрія скіфського курганного могильника Катеринівка у Нижньому Подніпров'ї. *Геофізичний журнал*, 41, 134–152.
- Бондар, К.М., Ієвлев, М.М., Петраускас, А.В., Тарабукін, О.О., Хадарова, М.В., Цюпа, І.В. (2018). Древлянські старожитності. *Археологічні дослідження в Житомирі*. К.: Видавництво "Стародавній світ".
- Бондар, К.М., Петраускас, О.В., Хоменко, Р.В., Попов, С.А. (2022). Геомагнітне знімання та петромагнітна характеристика ґрунтів та археологічних об'єктів пам'яток пізньоримського часу біля Комарова у Середньому Подністров'ї. *Геофізичний журнал*, 44, 2, 29–52.
- Бондарь, К.М., Хоменко, Р.В., Чернов, А.П., Кукса, Н.В. (2020). Результаты георадарного обследования Ильинской церкви — усыпальницы Богдана Хмельницкого в Субботове. *Геофизический журнал*, 3, 42, 175–194.
- Буйських, А.В., Формасье, Й., Шейко, І.М., Чечупіна, І.О. (2020). Нові дослідження Терасного міста Ольвії. *Археологічні дослідження в Україні в 2018 р.*, Київ: ІА НАН України, 130–133.
- Владов, М.Л., Старовойтов, А.В. (2004). Введение в георадиолокацию. М.: Издательство МГУ.
- Грошевой, Г.В., Галкин, Л.Л., Зайончковский, М.А. (1967). Археологическая разведка магнитометром направленного действия. *Советская археология*, 3, 191–204.
- Даниленко, В.Н., Дудкин, В.П., Круц, В.А. (1967). Археолого-магнитная разведка в Киевской области. *Археологические исследования на Украине. 1965–1966 гг.* Киев.
- Дудкин, В.П. (1970). К вопросу о применении дифференциального магнитометра в археологической разведке. *Советская археология*, 1.
- Дудкин, В.П. (1978). Геофизическая разведка крупных трипольских поселений. *Использование методов естественных наук в археологии*. Київ: Наукова думка, 35–45.

- Загний, Г.Ф., Круц, В.А., Русаков, О.М. (1971). Опыт применения протонного магнитометра в археологии. *Советская археология*, 3, 203–207.
- Ивакин, Г.Ю., Дараган, М.Н., Орлюк, М.И., Кравченко, Э.А., Куприй, С.А. (2005). Геофизические археологические исследования на Хотовском городище скифской эпохи. *Археологические открытия на Украине за 2004 г.*, 400–406.

- Кошелев, И.Н. (2005а). Магнитная разведка археологических памятников. Киев.

- Кошелев, И.Н. (2005б). Памятники трипольской культуры (по данным магнитной разведки). Киев.

- Орлюк, М., Ролле, Р., Роменец, А., Ульрих, Б., Цольнер, Х. (2016). Микромагнитная съемка Большого Бельского городища скифского времени, Полтавская область. *Геофизический журнал*, 5(38), 25–39.

- Рудь, В., Улрау, Р., Манігда, О. (2016). Геомагнітна зйомка та географічне моделювання у вивченні поселення трипільської культури Тростянички. *Вісник рятівної археології (Acta archaeologicae conservativae)*, 2, 55–76.

- Франтов, Г.С. (1963). Применение геофизических методов разведки в археологии. *Тезисы докладов на Всесоюзном совещании по применению в археологии методов естественных и технических наук*. Ин-т археологии АН СССР.

- Франтов, Г.С., Пинкевич, А.А. (1966). Геофизика в археологии. Л.: "Недра".

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

- Шилик, К.К. (1965). Опыт применения магниторазведки на древнерусском городище. *Археология и естественные науки*, Москва, 252–256.

- Шилик, К.К. (1968). Применение магниторазведки при исследовании средневековых памятников в Крыму. *Средневековые памятники Восточной Европы. Краткие сообщения Института археологии*, 113, 123–130.

- Шилик, К.К. (1974). О магниторазведке гончарных печей у Чабан-Куле. *Восточная Европа в I II тысячелетии н.э. Краткие сообщения института археологии*. М.: Наука, 140, 115–120.

- Шмаглій, М.М., Відейко, М.Ю. (1992). Трипільські поселення на Черкащині. *Археологія*, 3, 124–130.

- Шмаглій, М.М., Дудкін, В.П., Зінковський, К.В. (1973). Про комплексне вивчення трипільських поселень. *Археологія*, 10, 23–31.

- Aitken, M.J. (1958). Magnetic prospecting. *Archaeometry*, 1(1), 16–20.

- Atkinson, R.J.C. (1953). *Field Archaeology*. 2nd ed., London.

- Bartington, G. and Chapman, C.E. (2004). A high-stability fluxgate magnetic gradiometer for shallow geophysical survey applications. *Archaeological Prospection*, 11 (1), 19–34.

- Becker, H. (1985). Luftbild, Magnetik und digitale Bildverarbeitung zur Prospektion archäologischer Fundstätten. *Archaeologische Informationen*, 8, 135–142.

- Becker, H. (1995). From nanotesla to picotesla – a new window for magnetic prospecting in archaeology. *Archaeological Prospection*, 2, 217–228.

- Becker, H. and Fassbinder, J.W.E. (1999). Magnetometry of a Scythian settlement in Siberia near Cichin the Baraba steppe. In J.W.E. Fassbinder and W.E. Irlinger (eds), *Archaeological prospection. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege* 108: 169–172.

- Belshé, J. C., (1957). Recent magnetic investigations at Cambridge University. *Advances in Physics*, 6(22), 192–193.
- Berge, M.A., Drahor, M.G. (2011). Electrical Resistivity Tomography Investigations of Multilayered Archaeological Settlements: Part I – Modelling. *Archaeol. Prospect*, 18, 159–171. <https://doi.org/10.1002/arp.423>
- Bondar, K., Fassbinder, J.W.E., Didenko, S.V., Hahn, S.E. (2022). Rock magnetic study of grave infill as a key to understanding magnetic anomalies on burial ground. *Archaeological Prospection*, 29(1), 139–156.
- Bondar, K.M., Sohatskij, M.P., Chernov, A., Popko, Ya., Petrokushyn, O., Baryshnikova, M., Khomenko, R., Boyko, M. (2021) Geophysical assessment of Verteba Cave Eneolithic site, Ukraine. *Geoarchaeology*, 36, 238–251.
- Booth, A.D., Linford, N.T., Clark, R.A., & Murray, T. (2008). Three-dimensional, multi-offset ground-penetrating radar imaging of archaeological targets. *Archaeological Prospection*, 15(2), 93–112.
- Chapman J., Videiko M., Gaydarska B., Burdo N., Hale D., Willis R., Swann N., Thomas N., Edwards P., Blair A., Hayes A., Nebbia M., Rud V. (2014). The Planning of the Earliest European Proto-Towns: A New Geophysical Plan of the Trypillia Mega-Site of Nebelivka, Kirovograd Domain, Ukraine, *Antiquity Gallery*.
- Clark, A. (1990). *Seeing Beneath the Soil-Prospicing Methods in Archaeology*. B.T. Batsford: London.
- Clarke, M.C., Utsi, E. and Utsi, V. (1999). Ground-penetrating radar investigations at North Ballachulish Moss, Scotland. *Archaeological Prospection*, 6, 107–121.
- Constable, S.C., Parker, R.L., Constable, C.G. (1987). Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetism sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289–300.
- Conyers, L.B. (2017). Ground-penetrating Radar. In: *Encyclopedia of Geoarchaeology*, Gilbert, A. (Ed.), Heidelberg, London, New York, 367–379.
- Conyers, L.B., Goodman, D. (1997). Ground-penetrating Radar: *An Introduction for Archaeologists*. AltaMira Press, Walnut Creek, California.
- Dabas, M. (2008). Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP. In *Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology*. Campana, S., Piro, S. (Eds.) CRC Press, 105–126. <https://doi.org/10.1201/9780203889558>
- Drahor, M.G., Berge, M.A., Kurtulmus, T.O., Hartmann, M., Speidel, M. (2008). Magnetic and Electrical Resistivity Tomography Investigations in a Roman Legionary Camp Site (Legio IV Scythica) in Zeugma, Southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeol. Prospect*, 15, 159–186.
- Du Mesnil du Buisson, R. (1934). *La technique des fouilles archéologiques: les principes généraux*. Paris.
- English Heritage (1995). Geophysical survey in archaeological field evaluation, English Heritage, *Research and Professional Services Guideline 1*.
- Fischanger, F., Catanzariti, G., Comina, C., Sambuelli, L., Morelli, G., Barsuglia, F., Ellaihy, A., Porcelli, F. (2019). Geophysical anomalies detected by electrical resistivity tomography in the area surrounding Tutankhamun's tomb. *J. Cult. Heritage*, 36, 63–71.
- Fischer, P. M. (1980a). Geophysical prospecting at Hala Sultan Tekke, Cyprus. *Journal of Field Archaeology*, 7, 479–484.
- Gabler, M., Trinks, I., Nau, E., Hinterleitner, A., Paasche, K., Gustavsen, L., Kristiansen, M., Tønning, C., Schneidhofer, P., Kucera, M., Neubauer, W. (2019). Archaeological Prospection with Motorised Multichannel Ground-Penetrating Radar Arrays on Snow-Covered Areas in Norway. *Remote Sens.*, 11, 2485. <https://doi.org/10.3390/rs11212485>
- Gaffney, C., & Gater, J. (2003). Revealing the buried past. *Geophysics for Archaeologists*, Stroud.
- Gaffney, C.F., Gater, J., Linford, A.P., Gaffney, V.L. and White, R. (2000). Large-scale systematic fluxgate gradiometry at the roman city of Wroxeter. *Archaeological Prospection*, 7(2), 81–99.
- Golebiowski, T. (2006). 3D GPR measurements for archaeological application with interpretation aided by numerical modelling. *Acta Geophysica*, 54, 4, 413–429. DOI 10.2478/s11600-006-0027-6
- Goodman, D. and Nishimura, Y. (1993). A groundradar view of Japanese burial mounds. *Antiquity*, 67, 349–354.
- Herbich, T. (2015). Magnetic prospecting in archaeological research: a historical outline. *Archaeologia Polona*, 53, 21–68.
- Leckebusch, J. (2003). Ground-penetrating Radar: A modern three-dimensional prospecting method. *Archaeological Prospection*, 10, 213–240.
- Linzen S., Schultze V., Chwala A., Schüller T., Schulz M., Stolz R. and Meyer H. (2009). Quantum Detection Meets Archaeology—Magnetic Prospection with SQUIDS, Highly Sensitive and Fast. In: M. Reindel, G.A. Wagner (eds.), *New Technologies for Archaeology, Natural Science in Archaeology, Multidisciplinary Investigations in Palpa and Nasca*, Peru.
- Loke, M.H., Barker, R.D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60(6), 1682–1690.
- Loke, M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. *Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software*.
- McCann, W.A. (1995). GPR and archaeology in central London. *Archaeological Prospection*, 2, 155–166.
- Meats, C. and Tite, M. (1995). A ground-penetrating radar survey at Rowbury Copse Banjo enclosure Wiltshire. *Archaeological Prospection*, 2, 229–236.
- Mol, L., Preston, P. (2010). The writing's in the wall: A review of new preliminary applications of electrical resistivity tomography within archaeology. *Archaeometry*, 52(6), 1079–1095.
- Neubauer, W. and Eder-Hinterleitner, A. (1997). Resistivity and magnetics in the Roman town Carnuntum, Austria: an example of combined interpretation of prospecting data. *Archaeological Prospection*, 4, 179–189.
- Neubauer, W. and Melichar, P. (eds) (2010). *Mittelneolithische Kreisgrabenanlagen in Niederösterreich. Mitteilungen der Prahistorischen Kommission*, 71, Wien.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., & Melichar, P. (2002). Georadar in the Roman civil town Carnatum, Austria: An approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9, 135–156.
- Neubauer, W., Melichar, P. and Eder-Hinterleitner, A. (1995). Magnetische Prospektion der frühneolithischen Kreisgrabenanlage von Strögen, Niederösterreich. *Archaeologia Austriaca*, 79, 179–186.
- Noel M. and Xu B. 1991. Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, 107, 95–102.
- Packard, M. and Varian, R. (1954). Free nuclear induction in the Earth's magnetic field. *Phys. Rev.*, 93, 941.
- Panissod, C., Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, J., Tabbagh, A. (1998). Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics*, 63, 1542–1550.
- Papadopoulos, N.G., Tsourlos, P., Tsokas, G.N. and Sarris, A. (2006). Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeol. Prospect*, 13, 163–181. <https://doi.org/10.1002/arp.276>
- Papadopoulos, N.G.; Tsokas, G.N.; Dabas, M.; Yi, M.-J.; Kim, J.-H.; Tsourlos, P. (2009). Three-dimensional inversion of automatic resistivity profiling data. *Archaeol. Prospect.*, 16, 267–278.
- Patzelt A., Fornasier J., Buysikh A., Ivchenko A., Kuzmischev A. (2016). Geomagnetic prospections in the suburb of Olbia Pontike – an ancient Greek Colony in the northern Black Sea area, Ukraine. *ISAP News*, 45, 3–6.
- Patzelt A., Waldhör M. (2021). Geomagnetische Prospektionen in der sogenannten Vorstadt Olbia Pontikes. In: Fornasier J., Buysikh A.V. *An den Ufern des Bug. Deutsch-ukrainische Ausgrabungen in Olbia Pontike im Kontext internationaler Forschungen zu antiken Migrationsprozessen*. Bonn: Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH, *Frankfurt Archaeological Studies*, 42, 137–154.
- Piroddi, L., Calcina, S.V., Trogu, A., and Ranieri, G. (2020). Automated Resistivity Profiling (ARP) to Explore Wide Archaeological Areas: The Prehistoric Site of Mont'e Prama, Sardinia, Italy. *Remote Sens*, 12(3), 461.
- Polin, S., Daragan, M., Bondar, K. (2020). New investigations on Scythian kurgans in Ukraine: non-invasive studies and excavations. In: St.J. Simpson and S. Pankova, eds., *Masters of the Steppe: the Impact of the Scythians and Later Nomad Societies of Eurasia*. London: Archaeopress, 472–482.
- Ralph, E.K. (1964). Comparison of a Proton and a Rubidium Magnetometer for Archaeological prospecting. *Archaeometry*, 7, 20–27.
- Rassmann, K., Ohlrau, R., Hofmann, R., Mischka, C., Burdo, N., Videiko, M. & J. Müller, (2014). High precision Tripolye settlement plans, demographic estimations and settlement organization. *Journal of Neolithic Archaeology*, 16, 63–95.
- Sala, J., Linford, N. (2012). Processing stepped frequency continuous wave GPR systems to obtain maximum value from archaeological data sets. *Near Surface Geophysics*, 10 (1819), 3–10.
- Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453–464.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., & Herzog, I. (1990). *Archaeological prospecting and remote sensing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Smekalova, T., Voss, O., Smekalov, S., Myts, V. and Koltukhov, S. (2005). Magnetometric Investigations of Stone Constructions within Large Ancient Barrows of Denmark and Crimea. *Geoarchaeology*, 20, 5, 461–482.
- Smekalova, T., Bevan, B., Chudin, A., Garipov A. (2016). The Discovery of an Ancient Greek Vineyard. *Archaeological Prospecting*, 23, 15–26.
- Stolz, R., Zakosarenko, V.M., Schulz, M., Chwala, A., Fritsch, L., Meyer, H.G. (2004). Magnetic full tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications. *SEG Expanded Abstracts*, 23, 786–789.
- Stümpel, H. (1995). Untersuchungen in Kusakali 1992–1995, geophysikalische Prospektion. *Mitteilungen der Deutschen Orient-Gesellschaft*, 127, 5–36.
- Tite, M.S. (1961). Alternative instruments for magnetic surveying: comparative tests at the Iron Age fill-fort at Rainsborough. *Archaeometry*, 4, 85–90.
- Trinks, I., Stümpel, H. and Lörz, S. (1999). Integrated geophysical survey for archaeological prospecting. In J.W.E. Fassbinder and W.E. Irlinger (Eds.), *Archaeological prospecting. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege*, 108, 82–83.
- Trinks, I., Hinterleitner, A., Neubauer, W. et al. (2018). Large-area high-resolution ground-penetrating radar measurements for archaeological prospecting. *Archaeological Prospection*, 25, 171–195.
- Van De Vijver, E., Van Meirvenne, M., Saey, T., Delefortrie, S., De Smedt, P., De Pue, J., & Seuntjens, P. (2015). Combining multi-receiver electromagnetic induction and stepped frequency ground penetrating radar for industrial site investigation. *European journal of soil science*, 66(4), 688–698.
- Viberg, A., Trinks, I., & Lidén, K. (2011). A review of the use of geophysical archaeological prospecting in Sweden. *Archaeological Prospection*, 18(1), 43–65.
- Warren, C., Giannopoulos, A., & Giannakis, I. (2016). gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, 163–170.
- Zhou, B. & Dahlin, T. (2003). Properties and Effects of Measurement Errors on 2D Resistivity Imaging Surveying. *Near Surface Geophysics*, 1(3), 105–117.
- Zöllner, H., Ulrich, B., Rolle, R., Makhortyk, S. & Orlyuk, M. (2008). Results of Geophysical Prospection in the Scythian Settlement of Belsk (Bol.oe Belskoe Gorodi.ee). Layers of Perception: *Proc. of the 35th Intern. Conf. on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*,

Berlin, Germany, April 2.6, 2007 (Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte, Vol. 10. Dr. Rudolf Habelt GmbH, Bonn, pp. 25 + CD-ROM.

## References

- Aitken, M. J. (1958). Magnetic prospecting. *Archaeometry*, 1(1), 16–20.
- Antonova, I.A.; Glazunov, V.V.; Gots, I.A.; Shevnev, V.A.; Modin, I.N.; Belikov, V.V.; Urazaev, N.I.; Tarnopolskaya, N.B.; Ryzhov, S.G. (1979). Geological and geophysical investigations on the necropolis of Khersones. In: "New applications of physical and mathematical methods in archaeology". Moscow: Nadra, 10–19. [in Russian]
- Atkinson, R.J.C. (1953). *Field Archaeology*. 2nd ed., London.
- Bartington, G. and Chapman, C.E. (2004). A high-stability fluxgate magnetic gradiometer for shallow geophysical survey applications. *Archaeological Prospection*, 11 (1), 19–34.
- Becker, H. (1985). Luftbild, Magnetik und digitale Bildverarbeitung zur Prospektion archäologischer Fundstätten. *Archaeologische Informationen*, 8, 135–142.
- Becker, H. (1995). From nanotesla to picotesla – a new window for magnetic prospecting in archaeology. *Archaeological Prospection*, 2, 217–228.
- Becker, H. and Fassbinder, J.W.E. (1999). Magnetometry of a Scythian settlement in Siberia near Cicahin the Baraba steppe. In J.W.E. Fassbinder and W.E. Irlinger (Eds), *Archaeological prospection*. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, 108, 169–172.
- Belshé, J. C. (1957). Recent magnetic investigations at Cambridge University. *Advances in Physics*, 6(22), 192–193.
- Berge, M.A.; Drahov, M.G. (2011). Electrical Resistivity Tomography Investigations of Multilayered Archaeological Settlements: Part I – Modelling. *Archaeol. Prospect*, 18, 159–171. <https://doi.org/10.1002/arp.423>
- Bondar, K., Daragan, M., Prilukov, V., Polin, S. V., Tsiupa, I. V., Didenko, S. V. (2019). Magnetometry of the Scythian burial ground Katerinovka in the Lower Dnieper region. *Geophysical Journal*, 3, 41, 134–152. [doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172438](https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172438) [in Ukrainian]
- Bondar, K., Fassbinder, J.W.E., Didenko, S.V., Hahn, S.E. (2022). Rock magnetic study of grave infill as a key to understanding magnetic anomalies on burial ground. *Archaeological Prospection*, 29(1), 139–156.
- Bondar, K.M., Iyevlev, M.M., Petrauskas, A.V., Tarabukin, O.O., Hadadova, M.V. and Tsiupa, I.V. (2018). Drevlyanin's antiquity. Archaeological investigations in Zhytomyr. Kyiv. Antiquity world. 188 p. [in Ukrainian]
- Bondar, K.M., Khomenko, R.V., Chernov, A.P., Kuksa, N.V. (2020). Results of the ground penetrating radar survey in the Church of St. Elias – Bohdan Khmelnytsky burial vault in Subotiv. *Geophysical Journal*, 42, 3, 175–194. [in Ukrainian]
- Bondar, K.M., Petrauskas, O.V., Khomenko, R.V., Popov, S.A. (2022). Magnetic prospecting and rock magnetic study of soils and archaeological objects on the Late Roman time sites near Komariv in Middle Transnistria. *Geophysical Journal*, 42, 2, 29–52. [in Ukrainian]
- Bondar, K.M., Sohatskij, M.P., Chernov, A., Popko, Ya., Petrokushyn, O., Baryshnikova, M., Khomenko, R., Boyko, M. (2021). Geophysical assessment of Verteba Cave Eneolithic site, Ukraine. *Geoarchaeology*, 36, 238–251.
- Bondar, K., Bobrovskiy, T., Tsiupa, I. (2016). Efficiency of GPR Survey for Archaeological Targets Detection in the National Conservation Area of "St. Sophia of Kyiv". *Geoinformatika*, 4 (60), 75–82. [in Ukrainian]
- Booth, A.D., Linford, N.T., Clark, R.A., & Murray, T. (2008). Three-dimensional, multi-offset ground-penetrating radar imaging of archaeological targets. *Archaeological Prospection*, 15(2), 93–112.
- Bujskih, A.V., Fomasier, J., Sheiko, I.M., Chechulina, I.O. (2020). New investigations of the Terrace Olbia polis. *Archaeological researches in Ukraine in 2018*. Kyiv, Institute of archaeology of the NASU, 130–133. [in Russian]
- Chapman, J., Videiko M., Gaydarska B., Burdo N., Hale D., Willis R., Swann N., Thomas N., Edwards P., Blair A., Hayes A., Nebbia M., Rud, V. (2014). The Planning of the Earliest European Proto-Towns: A New Geophysical Plan of the Trypillia Mega-Site of Nebelivka, Kirovograd Domain, Ukraine, *Antiquity Gallery*.
- Clark, A. (1990). *Seeing Beneath the Soil-Prospection Methods in Archaeology*. B.T. Batsford: London.
- Clarke, M. Ciara, Utsi, Erica and Utsi, Vincent, (1999). Ground-penetrating radar investigations at North Ballachulish Moss, Scotland. *Archaeological Prospection*, 6, 107–121.
- Constable, S.C., Parker, R.L., Constable, C.G. (1987). Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289–300.
- Conyers, L.B. (2017). Ground-penetrating Radar. In: *Encyclopedia of Geoarchaeology*. Gilbert, A. (Ed.). Heidelberg, London, New York, 367–379.
- Conyers, L.B. Goodman, D. (1997). *Ground-penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. AltaMira Press, Walnut Creek, California.
- Dabas, M. (2008). Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP. In Seeing the Unseen. *Geophysics and Landscape Archaeology*. Campana, S., Piro, S. (Eds.) CRC Press, 105–126. <https://doi.org/10.1201/9780203889558>
- Danilenko, V.N., Dudkin, V.P., Krutz, V.A. (1967). Archaeo-magnetic prospecting in Kyiv Oblast. *Archaeological researches in Ukraine. 1965–1966*. Kiev. [in Russian]
- Drahov, M.G., Berge, M.A., Kurtulmus, T.O., Hartmann, M., Speidel, M. (2008). Magnetic and Electrical Resistivity Tomography Investigations in a Roman Legionary Camp Site (Legio IV Scythica) in Zeugma, Southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeol. Prospect*, 15, 159–186.
- Du Mesnil du Buisson, R. (1934). La technique des fouilles archéologiques: les principes généraux. Paris.
- Dudkin, V.P. (1970). On applying differential magnetometer for archaeological prospecting. *Sovetskaya arheologiya*, 1, 272–277. [in Russian]
- Dudkin, V.P. (1978). Geophysical prospecting of large Trypillian sites. In "Application of methods of natural sciences in archaeology." Kyiv: Naukova dumka, 35–45. [in Russian]
- English Heritage. (1995). Geophysical survey in archaeological field evaluation. English Heritage, *Research and Professional Services Guideline*, 1.
- Fischanger, F., Catanzariti, G., Comina, C., Sambuelli, L., Morelli, G., Barsuglia, F., Ellaithy, A., Porcelli, F. (2019). Geophysical anomalies detected by electrical resistivity tomography in the area surrounding Tutankhamun's tomb. *J. Cult. Heritage*, 36, 63–71.
- Fischer, P.M. (1980a). Geophysical prospecting at Hala Sultan Tekke, cyprus. *Journal of Field Archaeology*, 7, 479–484.
- Frantov, G.S. (1963). Application of geophysical methods in archaeology. *Abstracts of reports at the All-Union Conference on the Application of the Methods of the Natural and Technical Sciences in Archeology*. Institute of archaeology of NAS of USSR. [in Russian]
- Frantov, G.S., Pinkevich, A.A. (1966). Geophysics in archaeology. Leningrad, Nedra. [in Russian]
- Gabler, M., Trinks, I., Nau, E., Hinterleitner, A., Paasche, K., Gustavsen, L., Kristiansen, M., Tønning, C., Schneidhofer, P., Kucera, M., Neubauer, W. (2019). Archaeological Prospection with Motorised Multichannel Ground-Penetrating Radar Arrays on Snow-Covered Areas in Norway. *Remote Sens.*, 11, 2485. <https://doi.org/10.3390/rs11212485>
- Gaffney, C., & Gater, J. (2003). Revealing the buried past. *Geophysics for Archaeologists*. Stroud.
- Gaffney, C.F., Gater, J., Linford, A.P., Gaffney, V.L. and White, R. (2000). Large-scale systematic fluxgate gradiometry at the roman city of Wroxeter. *Archaeological Prospection*, 7(2), 81–99.
- Golebiewski, T. (2006). 3D GPR measurements for archaeological application with interpretation aided by numerical modelling. *Acta Geophysica*, 54, 4, 413–429. DOI 10.2478/s11600-006-0027-6
- Goodman, D. and Nishimura, Y. (1993). A groundradar view of Japanese burial mounds. *Antiquity*, 67, 349–354.
- Groshevoj, G.V., Galkin, L.L., Zayonchkovskij, M.A. (1967). Archaeological prospecting using directed magnetometer. *Sovetskaya arheologiya*, 3, 191–204. [in Russian]
- Herbich, T. (2015). Magnetic prospecting in archaeological research: a historical outline. *Archaeologia Polona*, 53, 21–68.
- Ivakin, G.Yu., Daragan, M.N., Orliuk, M.I., Kravchenko, E.A., Kuprij, S.A. (2005). Geophysical and archaeological investigations on Hotiv hillfort of Scythian time. *Archaeological researches in Ukraine in 2004*, 400–406. [in Russian]
- Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). New high-resolution shallow-depth multi-electrode equipment for electrical resistivity tomography). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(61), 36–40. [in Ukrainian]
- Koshelev, I.N. (2005a) Magnetic prospecting of archaeological sites. Kiev. [in Russian]
- Koshelev, I.N. (2005b). Trypillian culture sites (by magnetometer survey results). Kiev. [in Russian]
- Leckebusch, J. (2003). Ground-penetrating Radar: A modern three-dimensional prospecting method. *Archaeological Prospection*, 10, 213–240.
- Linzen S., Schultze V., Chwala A., Schüller T., Schulz M., Stolz R. and Meyer H. (2009). Quantum Detection Meets Archaeology—Magnetic Prospection with SQUIDS, Highly Sensitive and Fast. In: M. Reindel, G.A. Wagner (Eds.) *New Technologies for Archaeology, Natural Science in Archaeology, Multidisciplinary Investigations in Palpa and Nasca, Peru*.
- Loke, M.H., Barker, R.D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60(6), 1682–1690.
- Loke, M.H. (2009). RES2DINV, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. *Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo software*.
- McCann, W.A. (1995). GPR and archaeology in central London. *Archaeological Prospection*, 2, 155–166.
- Meats, C. and Tite, M. (1995). A ground-penetrating radar survey at Rowbury Copse Banjo enclosure Wiltshire. *Archaeological Prospection*, 2, 229–236.
- Mol, L., Preston, P. (2010). The writing's in the wall: A review of new preliminary applications of electrical resistivity tomography within archaeology. *Archaeometry*, 52(6), 1079–1095.
- Neubauer, W. and Eder-Hinterleitner, A. (1997). Resistivity and magnetics in the Roman town Carnuntum, Austria: an example of combined interpretation of prospecting data. *Archaeological Prospection*, 4, 179–189.
- Neubauer, W. and Melichar, P. (Eds.) (2010). *Mittelnöolithische Kreisgrabenanlagen in Niederösterreich. Mitteilungen der Prähistorischen Kommission*, 71, Wien.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., & Melichar, P. (2002). Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: An approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9, 135–156.
- Neubauer, W., Melichar, P. and Eder-Hinterleitner, A. (1995). Magnetische Prospektion der frühneolithischen Kreisgrabenanlage von Strögen, Niederösterreich. *Archaeologia Austriaca*, 79, 179–186.
- Noel, M. and Xu, B. (1991). Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, 107, 95–102.

- Orlyuk, M., Rolle, R., Romenets, A., Ullrich, B., Zollner, H. (2016). Micromagnetic survey of the Big Belsky site of ancient settlement of the Scythian time in Poltava oblast. *Geophysical journal*, 5(38), 25-39. [in Russian]
- Packard, M. and Varian, R. (1954). Free nuclear induction in the Earth's magnetic field. *Phys. Rev.*, 93, 941.
- Panissod, C.; Dabas, M.; Hesse, A.; Jolivet, A.; Tabbagh, J.; Tabbagh, A. (1998). Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics*, 63, 1542–1550.
- Papadopoulos, N.G., Tsourlos, P., Tsokas, G.N. and Sarris, A. (2006). Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeol. Prospect.*, 13, 163-181. <https://doi.org/10.1002/arp.276>
- Papadopoulos, N.G.; Tsokas, G.N.; Dabas, M.; Yi, M.-J.; Kim, J.-H.; Tsourlos, P. (2009). Three-dimensional inversion of automatic resistivity profiling data. *Archaeol. Prospect.*, 16, 267–278.
- Patzelt, A., Fornasier, J., Buyskikh, A., Ivchtchenko, A., Kuzmischev, A. (2016). Geomagnetic prospecting in the suburb of Olbia Pontike – an ancient Greek Colony in the northern Black Sea area, Ukraine. *ISAP News*, 45, 3-6.
- Patzelt, A., Waldhör, M. (2021). Geomagnetische Prospektionen in der sogenannten Vorstadt Olbia Pontikes. In: Fornasier J., Bujskikh A.V. *An den Ufern des Bug. Deutsch-ukrainische Ausgrabungen in Olbia Pontike im Kontext internationaler Forschungen zu antiken Migrationsprozessen*. Bonn: Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH, *Frankfurt Archaeological Studies*, 42, 137-154.
- Piroddi, L., Calcina, S.V., Trogu, A., and Ranieri, G. (2020). Automated Resistivity Profiling (ARP) to Explore Wide Archaeological Areas: The Prehistoric Site of Monte Prama, Sardinia, Italy. *Remote Sens*, 12(3), 461. <https://doi.org/10.3390/rs12030461>
- Polin, S., Daragan, M., Bondar, K. (2020). New investigations on Scythian kurgans in Ukraine: non-invasive studies and excavations. In: St.J. Simpson and S. Pankova (Eds) *Masters of the Steppe: the Impact of the Scythians and Later Nomad Societies of Eurasia*. London: Archaeopress, 472-482.
- Ralph, E.K. (1964). Comparison of a Proton and a Rubidium Magnetometer for Archaeological prospecting. *Archaeometry*, 7, 20-27.
- Rassmann, K. & Ohlrau, R., Hofmann, R., Mischka, C., Burdo, N., Videiko, M. & Müller, J. (2014). High precision Tripolye settlement plans, demographic estimations and settlement organization. *Journal of Neolithic Archaeology*, 16, 63–95.
- Rud', V., Ulaugh, R., Manigda, O. (2016). Geomagnetic survey and geographical modeling on Trypillian culture settlement Trostyanchyk. *Visnyk ryatynnoji arheologii (Acta archaeologicae conservativae)*, 2, 55-76. [in Ukrainian]
- Sala, J., Linford, N. (2012). Processing stepped frequency continuous wave GPR systems to obtain maximum value from archaeological data sets. *Near Surface Geophysics*, 10 (1819), 3–10.
- Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453–464.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., & Herzog, I. (1990). *Archaeological prospecting and remote sensing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shmaglii, M.M., Dudkin, V.P., Zinkovsky, K.V. (1973). On the comprehensive study of Trypillia settlements. *Archeology*, 10, 23-31. [in Russian]
- Shmaglii, M.M., Videyko, M.Yu. (1992). Trypillia settlements in Cherkasy region. *Archeology*, 3, 124 – 130. [in Russian]
- Shyliik, K.K. (1965). Experience in the use of magnetic prospecting in the Ancient Rus settlement. *Archeology and natural sciences*, Moscow, 252-256. [in Russian]
- Shyliik, K.K. (1968). The use of magnetic prospecting in the study of medieval monuments in the Crimea. *Medieval monuments of Eastern Europe. Brief Communications of the Institute of Archeology*, Moscow, Nauka, 113, 123-130. [in Russian]
- Shyliik, K.K. (1974). On the magnetic prospecting of pottery kilns near Chaban-Kul. *Eastern Europe in the I-II millennium AD. Brief Communications of the Institute of Archeology*, Moscow: Nauka, 140, 115-120. [in Russian]
- Smekalova, T., Voss, O., Smekalov, S., Myts, V. and Koltukhov, S. (2005). Magnetometric Investigations of Stone Constructions within Large Ancient Barrows of Denmark and Crimea. *Geoarchaeology*, 20, 5, 461-482.
- Smekalova, T., Bevan, B., Chudin, A., Garipov A. (2016). The Discovery of an Ancient Greek Vineyard. *Archaeological Prospecting*, 23, 15–26. <https://doi.org/10.1002/arp.1517>.
- Stolz, R., Zakosarenko, V.M., Schulz, M., Chwala, A., Fritsch, L., Meyer, H.G. (2004). Magnetic full tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications. *SEG Expanded Abstracts*, 23, 786–789.
- Stümpel, H. (1995). Untersuchungen in Kusakali 1992–1995, geophysikalische Prospektion. *Mitteilungen der Deutschen Orient-Gesellschaft*, 127, 5–36.
- Tite, M.S. (1961). Alternative instruments for magnetic surveying: comparative tests at the Iron Age fill-fort at Rainsborough. *Archaeometry*, 4, 85–90.
- Trinks, I., Stümpel, H. and Lorra, S. (1999). Integrated geophysical survey for archaeological prospecting. In J.W.E. Fassbinder and W.E. Irlinger (Eds) *Archaeological prospecting. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege*, 108, 82–83.
- Trinks, I., Hinterleitner, A., Neubauer, W. et al. (2018). Large-area high-resolution ground-penetrating radar measurements for archaeological prospecting. *Archaeological Prospection*, 25, 171–195.
- Van De Vijver, E., Van Meirvenne, M., Saey, T., Delefortrie, S., De Smedt, P., De Pue, J., & Seuntjens, P. (2015). Combining multi-receiver electromagnetic induction and stepped frequency ground penetrating radar for industrial site investigation. *European journal of soil science*, 66(4), 688–698.
- Viberg, A., Trinks, I., & Lidén, K. (2011). A review of the use of geophysical archaeological prospecting in Sweden. *Archaeological Prospection*, 18(1), 43–65.
- Vladov, M.P., Starovojtov, A.V. (2004). An introduction to ground penetrating radar. Moscow, published by MSU, 153 p. [in Russian]
- Warren, C., Giannopoulos, A., & Giannakis, I. (2016). gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, 163–170.
- Zagnij, G.F., Krutz, V.A., Rusakov, O.M. (1971). Experience in the use of a proton magnetometer in archeology. *Sovetskaya arheologiya*, 3, 203-207. [in Russian]
- Zhou, B. & Dahlin, T. (2003). Properties and Effects of Measurement Errors on 2D Resistivity Imaging Surveying. *Near Surface Geophysics*, 1(3), 105-117.
- Zöllner, H., Ullrich, B., Rolle, R., Makhortyk, S. & Orlyuk, M. (2008). Results of Geophysical Prospection in the Scythian Settlement of Belsk (Bol.oe Belskoe Gorodi.ëe). Layers of Perception: *Proc. of the 35th Intern. Conf. on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*, Berlin, Germany, April 2.6, 2007 (Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte, Vol. 10. Dr. Rudolf Habelt GmbH, Bonn, pp. 25 + CD-ROM).

Надійшла до редколегії 07.06.22

K. Bondar, Dr. Sci. (Geol.),  
E-mail: ks\_bondar@ukr.net;  
S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,  
E-mail: vyzhvas@gmail.com;  
Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;  
I. Sheiko, PhD (Hist.),  
E-mail: ira.sheiko@gmail.com,  
Institute of Archeology of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
12 Heroiv Stalingrad Ave., Kyiv, 04210, Ukraine;  
R. Kozlenko, PhD (Hist.),  
E-mail: rknoel@ukr.net,  
National Historical and Archaeological Reserve "Olbia" of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
47 Olviyska Str., p. Parutyne, Mykolaiv region, 57540, Ukraine

## ARCHAEOLOGICAL GEOPHYSICS IN THE WORLD AND IN UKRAINE: BEGINNING, DEVELOPMENT, PRESENT

*The article describes the history of the development of geophysical methods in archaeological studies in Europe, the USA, the former USSR and Ukraine. In the 1950s the researchers quickly proceeded from the first sampling to the mass magnetic and electric measurements. In the 1980s there was a transition to digital registration during field studies, as well as rapid development of data processing. This led to the introduction of some geophysical methods in archaeology, which require complex calculations when processing the signal and inversion of data, such as georadar method, electrical resistivity tomography, induction method, etc. At the current stage, there is a need to interpret these more and more detailed and large-scale geophysical data in the context of the differentiation of more and more weak in contrast physical properties, and small-scale inhomogeneities in the soil cover. Confirmation of the anthropogenic and technogenic occurrence of geophysical anomalies is searched for using direct measurement and modeling of physical parameters of soil and archaeological materials. The work also presents the achievements of domestic geophysicists, as they became the basis for the great modern archeological projects and made the archeological geophysics the fundamental part of the cultural heritage research in Ukraine.*

**Keywords:** geophysical methods, archeological site, review, Ukraine, magnetometry, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar.

УДК 550.34

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.03>

С. Кравець, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: [sergek@cb-igph.lviv.ua](mailto:sergek@cb-igph.lviv.ua);

Д. Малицький, д-р фіз.-мат. наук, проф.,

E-mail: [dmytro.malitsky@gmail.com](mailto:dmytro.malitsky@gmail.com);

О. Асташкіна, канд. геол. наук, наук. співроб.,

E-mail: [sac1@ukr.net](mailto:sac1@ukr.net);Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,  
відділ Методів сейсмотектонічних досліджень,  
вул. Наукова 36, м. Львів, 79060, Україна

## АКТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО АДАПТАЦІЇ СЕЙСМІЧНИХ ДАТЧИКІВ ДЛЯ ТЕХНОГЕННО НАВАНТАЖЕНИХ ТЕРИТОРІЙ

*(представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С. А. Вижвою)**Висвітлено експериментально перевірену методику корегування діапазону частот, амплітуд і рівня шуму для сейсмічних датчиків.**Підвищення рівня чутливості системи реєстрації у визначеному діапазоні частот дозволяє гнучко й у короткий термін досліджувати приуроченість мікроземлетрусів до різномасштабних геологічних структур і оцінювати параметри сейсмічного режиму, контролювати розвиток природних карстових явищ і техногенних тріщин та деформацій.**Представлено метод розширення меж застосування сейсmodатчиків типу СМ-3 та СМ-3 КВ у складі сейсмічних каналів портативних сейсмічних станцій, які застосовуються в Україні для розв'язання низки задач сейсмології у техногенно навантажених регіонах із високим рівнем промислових середньодобових шумових компонент.**Як приклад наведено деякі результати реєстрації сейсмічних сигналів, виконаної системою збирання інформації з використанням додаткових коректованих сейсмічних датчиків СМ-3 із розширеним частотним діапазоном у низькочастотну область спектра в діапазоні 0,1–3 Гц, проведеної на станції Carp-Lviv-2.**Ключові слова: сейсмічна подія, інженерно-геофізичні дослідження, спектрально-часовий аналіз, сейсмічний моніторинг, тимчасовий пункт сейсмічних спостережень.*

**Постановка проблеми.** Сейсмонезбезпечні райони із прогнозованою інтенсивністю сейсмічних струшувань 6–9 балів становлять близько 20 % території України (~120 тис. км<sup>2</sup>) з населенням понад 10 млн людей. Райони із прогнозованою інтенсивністю 7–9 балів становлять 12 % території країни, в них розташовано майже 80 населених пунктів, у яких проживають 7 млн людей. Загалом до 40 % території України може бути охоплено безпосереднім впливом небезпечних сейсмічних подій і до 70 % – спільним впливом землетрусів і підтоплення, зсувів, осідань та інших інженерно-геологічних процесів, які негативно впливають на стійкість споруд (Немчинов та ін., 2013) і можуть призвести до загибелі людей.

Попередження і захист від небезпечних природних та природно-техногенних процесів можливі лише за наявності системи моніторингу геологічних полів, яка дозволяла б оцінити стан і зміни геологічного середовища в режимі реального часу.

Всебічне вивчення динаміки хвильових полів у взаємозв'язку із природними та техногенними процесами становить інтерес щодо оцінювання можливості та надійності передбачення майбутніх сейсмічних подій. Якісний аналіз просторово-часових змін прогностичних параметрів буде вдалим, якщо застосовувати надійні широкопasmові системи моніторингу. На сьогоднішній день загальносвітова практика сейсмологічних спостережень для успішного розв'язання наукових завдань, особливо в сейсмоактивних регіонах, полягає у різкому збільшенні кількості стаціонарних і провізорських сейсmostанцій та їхнього оснащення широкопasmовою високочутливою апаратурою. Однак такий підхід вимагає настільки величезних фінансових витрат, що найближчим часом подібні проекти в Україні важко здійснити.

У відділі методів сейсмотектонічних досліджень КВ ІГФ ім. С. І. Субботіна НАН України апробовано метод розширення меж застосування поширених сейсmodатчиків типу СМ-3 та (СМ-3 КВ) у складі сейсмічних каналів портативних сейсмічних станцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Слід зазначити надзвичайно обмежену кількість публікацій, присвячених розглядуваній тематиці, із прикладами застосування методів частотного корегування АЧХ приладів (Рыков, 1963, 1972; Al-Alaoui, 2001).

**Виділення нерозв'язаних раніше аспектів загальної проблеми.** Хоча методика корегування хвильових форм відома (Al-Alaoui, 2001), застосування її для сейсмічних датчиків у різних діапазонах частот, амплітуд та рівнів шуму практично не обговорювалося і не перевірялося експериментально.

**Мета** – побудова та застосування системи збирання і передавання даних комплексних геофізичних спостережень із контролем метеопараметрів, що включає системи збереження акустичних сейсмічних сигналів із додатковим коректуванням каналом для передбачення можливого виникнення неприпустимих вібрацій і пульсацій на нижній границі сейсмічного діапазону та оцінювання зміни характеристик геологічного середовища під впливом сейсмічних коливань як від віддалених землетрусів, так і від промислових джерел.

**Фізико-геологічні передумови застосування методів частотного корегування АЧХ сейсmodатчиків.** Верхні оболонки земної кори необхідно розглядати як складнопобудовані шари, наповнені дискретною системою блоків, між якими є з'єднувальні або контактні прошарки з менш консолідованого матеріалу, на яких проходять розломи і тріщини і вздовж яких може відбуватися відносний рух цих блоків. Ці коливальні рухи блоків на границях можна розглянути за аналогією коливання маси, підвішеної на пружині. Для побудови й дослідження такої моделі та розв'язання конкретних задач необхідно знати параметри коливальної системи, а також дискретний розмір обмеженого блока і пористість матеріалу на його контактних границях, тобто довжину розлому  $L$  у кілометрах та пружність у МПа/м. Відповідно до найпростішої моделі "маса на пружині" коливання блока розміром  $A \times B \times V$  на межі із твердістю  $N$  можна описати власною частотою коливань  $T$ . Для блоків із

© Кравець С., Малицький Д., Асташкіна О., 2022

характерним розміром  $B = 10$  км можна передбачити характерні періоди коливань у десятки секунд ( $T = 1/f$ ) або  $\leq 0,1$  Гц (Беседина, Кабыченко, 2011). Варто зазначити, що крім таких власних коливань блока при поширенні сейсмічних хвиль у середовищі виникають і коливання із частотою, що відповідає відбиттю коливань від міжблокових границь. Інструментальне дослідження деформаційних властивостей порушень різної будови та масштабів проводиться протягом багатьох років на геофізичних станціях Карпатської сейсмопрогностичної мережі та представлено в роботах (Кравець та ін., 2019; Латынина, 2007).

На заключній стадії циклу ступінчастого ковзання зсувна твердість контакту стає в кілька десятків разів нижче максимального значення. Таке зниження міцності в контактній зоні перед виникненням динамічного зриву може виявитися чутливим індикатором переходу системи у нестабільний стан. Після ж землетрусу щільність порід буде зростати, відповідно й характерна частота системи "блок – розлом" буде змінюватись, що можна інтерпретувати як "захлопування" тріщин. Таке поведіння системи після динамічної події знаходить підтвердження в результатах аналізу низки деформографічних спостережень, проведених у Закарпатті на

РГС "Берегово", де фіксувалося у вигляді П-подібних столиків (Малицький, Кравець, 2010) протягом кількох діб до та після місцевих землетрусів.

Сейсмічний діапазон займає смугу від реєстрації припливних хвиль (Сасорова, Левин, 1999) до контролю сигналів акустичного діапазону. Сейсмоприймач – це магнітоелектричний пристрій маятникового типу, що перетворює механічні коливання на електричний сигнал. Вихідна напруга електричного сигналу пропорційна швидкості переміщення фундаменту, на якому розміщується датчик. Переважна більшість вітчизняного обладнання оснащена інженерними сейсмодатчиками СМ-3 і СМ3-КВ, які розраховані на обмежене коло завдань у середній смузі частот. Пристрій СМ-3 вважається лінійним сейсмічним датчиком у діапазоні від 0,5 Гц до 30 Гц із похибкою, достатньою для практичного застосування в задачах інженерної сейсмології. На рис. 1 відображено стандартизований хід АЧХ сейсмічного каналу Z-станції Carp-Lviv-2 із сейсмодатчиками СМ-3. Нижня границя відтворюваного датчиком СМ-3 діапазону частот визначається основною резонансною частотою маятника з катушкою ( $F = 0,59$  Гц). Частоти, які лежать нижче, ослаблені в десятки разів і містяться на рівні шумів сейсмічного каналу.

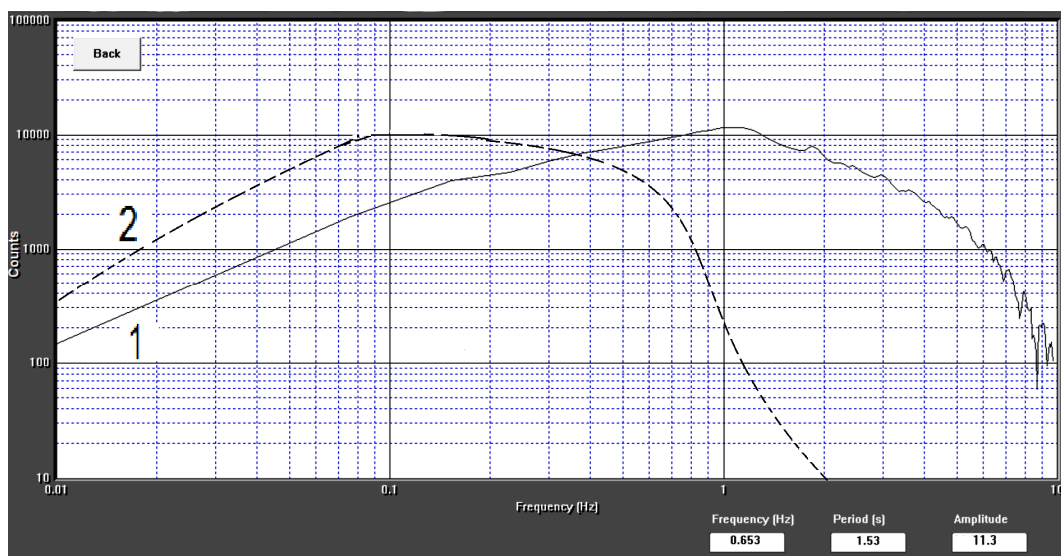


Рис. 1. АЧХ сейсмічного каналу Carp-Lviv-2:

1 – стандартна АЧХ сейсмодатчика; 2 – форма запланованого корегування АЧХ сейсмодатчика СМ-3.

Характеристики нескоректованого каналу Z ( $T = 1,6669$  с, частота власних коливань  $F = 0,599855$  Гц, демпферна константа  $h = 0,719$ , генераторна константа  $G_s = 19,3112$  (В/м  $\times$  с<sup>-1</sup>), опір котушки маятника  $R = 68$  Ом, погоджувальний опір для котушки затушення – це ультраконденсатор – іоністор ємністю 3,3 F (фарад)

**Методика.** Розширення діапазону можливе конструкційним, програмним або електронним способом. Безумовно, кожен із цих способів має як переваги, так і недоліки, які слід розглядати у конкретних випадках.

При конструюванні погоджувальних електронних схем підсилювачів сейсмічних каналів велику увагу приділяють мінімізації шуму.

До власного шуму підсилювача відносять:

- 1) тепловий шум (шум Джонсона);
- 2) шум Шоткі (дробовий);
- 3) флікер-шум.

У сейсмічній ділянці спектра як такий, що визначає динамічний діапазон вимірювального сейсмічного каналу загалом і граничну чутливість, для реєстрації мікросейсмів застосовують певний клас активних і

пасивних радіокомпонентів та спеціалізоване програмне забезпечення (ECAD – САПР), яке використовують із метою оптимізації параметрів схем і для подальшого застосування результатів моделювання у реальних конструкціях приладів, наприклад FilterLAB, Micro-Cap, Electronics Workbench, Lab VIEW тощо.

**Шум і температурні коливання** визначають якісні характеристики та межі застосування для систем збирання даних (Data Acquisition System). В описах технічних характеристик сейсмічного обладнання вказуються дві головні категорії шуму:

- 1) низькочастотний (0,1...10 Гц), амплітуда якого вимірюється у мкВ (мікрівольт) від піка до піка;
- 2) широкопasmовий, який вимірюється у мкВ або береться середньоквадратичне значення у мкВ для заданої смуги частот (напр. 0,01–10 Гц), або спектральна

щільність шуму. Спектральна щільність шуму вимірюється у Нв/√Гц.

Зазвичай зазначають низькочастотний і широкосмуговий шум окремо, тому що останній може бути значно зменшений у конкретному випадку, а саме при звуженні діапазону частот.

У нашому випадку оптимізація рівня шуму електронної схеми підсилювача для коректованого сейсмоприймача необхідна для зниження теплового або наведеного шуму, підвищення рівня амплітуд якого викликане додатковими коректувальними операційними підсилювачами й резисторами. Тепловий шум виникає у всіх провідниках за деякої термодинамічної температури  $T$ . Відомо, що температура є мірою хаотичного руху молекул речовини. Електрони також перебувають у стані хаотичного руху. Хаотичний тепловий рух носіїв заряду на границях провідника сприймається як завада – сторонній хаотичний сигнал. Отже, радикальним засобом боротьби з тепловими шумами є глибоке охолодження чутливих кіл схеми пристроїв. Нами було застосовано методику електронного охолодження навантажувального опору, але найкращі результати досягаються при охолодженні чутливих входних кіл схем до температури рідкого гелію (4,2 К) (Якимов, 2013). Публікація електронних схем дещо виходить за коло наукового спрямування журналу, отже, нижче буде наведено тільки загальну логіку їхньої роботи.

*Неохолоджений опір*  $R_1$  – це опір навантаження робочої котушки маятника СМ-3 у схемі підсилювача, який ставиться на "землю". Для зниження шуму "реальний" резистор навантаження  $R_1$  замінюється на "віртуальний" резистор навантаження із опором суттєво більшого номіналу, підключеного не на "землю", а на вихід операційного підсилювача  $U_1$ , що інвертує сигнал, із коефіцієнтом підсилення, що дорівнює відношенню величини застосованого резистора до величини необхідного навантаження. Наприклад, якщо потрібно навантаження опором  $R_1 = 47\text{ кОм}$ , то можна застосовувати резистор  $470\text{ кОм}$  та інвертувальний операційний підсилювач  $U_1$  із  $K_u = -10$ , де  $K_u$  – від'ємний коефіцієнт підсилення операційного підсилювача.

Зменшення шуму викликане тим, що шум навантажувального резистора  $R_1$ , наведений на вхід підсилювача  $U_1$ , дорівнює тепловому шуму резистора (значення якого дорівнює кореню квадратному із  $4KTR$ , де  $K$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура в кельвінах,  $R$  – опір в омах), поділеному в десять разів на подільнику з опору навантажувального резистора  $R_1$  та опору джерела сигналу СМ-3. Якщо ми збільшуємо опір навантажувального резистора у 100 разів, то коефіцієнт ділення збільшиться у 100 разів (якщо опір нашого джерела помітно менше опору навантажувального резистора  $R_1$ ), а шум навантажувального резистора – тільки у 10 разів. Отже, внесок шумів навантажувального резистора  $R_1$  зменшується у 10 разів. Підсилювач  $U_1$  потрібний тільки для того, щоб зберегти необхідне значення величини навантаження  $R_1$  для вихідного сигналу з робочої котушки маятника СМ-3. Якщо на "земляний"  $R_1$  вивід резистора подати посилений у  $K_u$  разів сигнал у протифазі, то опір навантаження, який "побачить" джерело сигналу, зменшиться у  $K_u$  разів, а точніше, у  $K + 1$  разів. Таким чином, ми одержуємо потрібний опір навантаження  $R_1$  та помітно зменшуємо його внесок у шуми вихідного сигналу. Те саме отримаємо, якщо спеціально охолодити навантажувальний резистор  $R_1$ , зменшивши його температуру. Таке підключення іноді називають *віртуальним охолодженням навантажувального опору*.

Для підвищення чутливості й розширення у низькочастотну область діапазону робочих частот реєстрації прискорень необхідно знизити основний резонанс маятника сейсмодатчика. Як відомо, рухома система маятника (маса з котушкою) в області основного резонансу є простою коливальною системою, що складається із маси і гнучкого підвісу. Резонансна частота  $F$  такої системи визначається формулою

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{mC}}, \quad (1)$$

де  $m$  – маса маятника і котушки та приєднаної маси повітря, грам;  $C$  – гнучкість підвісу, см/дин.

Таким чином, щоб конструкційно знизити основну резонансну частоту маятника сейсмодатчика, необхідно збільшити або масу з котушкою, або гнучкість їхнього підвісу, або те та інше разом. Найпростіше просто збільшити масу маятника  $m$ , розмістивши на ньому додатковий вантаж. Однак збільшувати рухома масу системи сейсмодатчика недоцільно, оскільки це знизить не тільки резонансну частоту, але й створюваний робочою котушкою вихідний сигнал. Генерований струм у рухомій котушці під дією сили  $P$  залежить від значення магнітної індукції між робочою котушкою та постійним магнітом, а коефіцієнт магнітної індукції – від кількості витків у котушці, її омичного опору і відстані до стінок постійного магніту:

$$P = B \times L \times I, \quad (2)$$

де  $B$  – магнітна індукція між робочою котушкою і постійним магнітом;  $L$  – довжина провідника робочої котушки.

З іншого боку, ця сила становить

$$P = m \times a, \quad (3)$$

де  $m$  – маса рухомої системи;  $a$  – коливальне прискорення.

Оскільки сила, прикладена до котушки маятника, залежить для сейсмодатчика тільки від величини прискорення, то при збільшенні маси у стільки ж разів зменшиться коливальне прискорення маятника. Оскільки вихідний сигнал, створюваний котушкою в цій області частот, пропорційний прискоренню маятника, то зменшення прискорення рівносильне зниженню вихідного сигналу. Якщо спробувати вдвічі знизити основну резонансну частоту сейсмодатчика, то для цього треба було б збільшити масу маятника датчика в чотири рази, і у стільки ж разів знизився би створюваний котушкою маятника при незмінному прискоренні  $a$  вихідний сигнал із робочої котушки. Крім того, збільшення маси підвищило б добротність ( $Q$ ) рухомої системи маятника і збільшило резонансний пік на АЧХ, а разом із ним – нерівномірність частотної характеристики вимірювального каналу, що, у свою чергу, погіршило б лінійність АЧХ перехідної характеристики сейсмічного каналу загалом. Отже, для зниження резонансної частоти датчика доцільніше збільшити гнучкість підвісу маятника, тобто зменшити зусилля кріплення його рухомої системи. Зробити це можна електронним способом, застосувавши відому (Havskov, Alguacil, 2002) техніку розділення частот і передавання певної частини корисного сигналу назад у робочу котушку сейсмодатчика, використавши активні додатний і від'ємний зворотний зв'язок за допомогою схеми на операційному підсилювачі (OPA 211 1.1-nv/√Hz Noise та BUF 634 3.9-nv/√Hz Noise) у діапазоні 0,01–10 Гц. У колі котушки дифмування, яка створює затухання вимушених коливань маятника, замість узгоджувального опору ми застосували конденсатор – іоністор ємністю 3,3 F (фарад), тим самим відімкнувши її дію на частотах нижче 0,01 Гц. Коли синфазна частина вихідного сигналу з робочої котушки після неінвертувального

інтегратора подається назад у котушку маятника, створюється від'ємний опір, коефіцієнт підсилення зростає та нівелює дію демпфера – іоністора на частотах 0,05–0,01 Гц. Демпферна константа  $h$  змінюється (рис. 1), а протифазна частина сигналу внаслідок кінцевої добротності ( $Q$ ) із від'ємним знаком впливає на основний резонансний частоті  $F$ . У такий спосіб досягається зниження основного резонансу маятника сейсмодатчика і корекція його АЧХ. Цей метод коригування повністю відповідає принципу суперпозиції, тобто реакція на суму впливу зовнішніх коливань дорівнює загальному прискоренню, або сумі реакцій на кожний сигнал окремо. Отже, вихідний сигнал синуса з амплітудою, наприклад, 50 мВ, можна вважати тотожним сумі впливу на сейсмодатчик двох синфазних прискорень із амплітудами 5 і 45 мВ. Для налаштованого датчика за лінійного коефіцієнта підсилення схеми з рівнем вихідної напруги при настроюванні як при 5, так і при 50 мВ, маємо отримати тотожний результат із кількісною відмінністю у 10 разів.

**Експериментальні дослідження.** Станція Carp-Lviv-2 введена в експлуатацію у лютому 2019 року та розташовується в м. Львів у будинку по вул. Наукова, 3б у підвальному приміщенні. Для проведення експерименту використовуються чотири сейсмодатчики СМ-3, три з яких працюють у перманентному режимі, з періодом власних коливань маятника 2 с і чутливістю близько 20 В/м/с, і коректований СМ-3 із періодом маятника 20 с (рис. 2).

Сейсмоприймачі розташовуються на горизонтальному майданчику в напрямку південь – північ, захід – схід, а третій і четвертий – довільно для реєстрації вертикальної складової  $z$ . Для реєстрації та збереження сигналів використовується система збирання інформації на базі персонального комп'ютера, що містить широкомуговий акустичний реєстратор ЗУА-3, сейсмоприймачі СМ-3 та цифровий багатоканальний термограф із кроком відліку 0,02°C/с. Реєструвальні датчики разом становлять широкопasmовий сейсмоакустичний канал із частотним діапазоном від 0,1 до 300 Гц. Всі його

компоненти встановлені на загальній платформі на бетонному фундаменті. Енергія значної частини зареєстрованих нами подій на станції зосереджена у високочастотній області спектра в ділянці 2–70 Гц, а амплітуда сейсмічних хвиль, що надходять від віддалених джерел, порівняно мала. Практичну користь становлять сейсмічні записи тих подій, рівень зареєстрованих коливань яких перевищує рівень шуму в кілька разів. Сигнали світових сейсмічних подій стають слабковидимими на тлі природного й техногенного шуму вже на відстанях кількох сотень кілометрів. Для досліджень у таких умовах і встановлено додатковий коректований сейсмодатчик СМ-3 із розширеним частотним діапазоном у низькочастотну область спектра в ділянці 0,1–3 Гц. На рис. 2 показано АЧХ коректованого сейсмічного каналу  $Z$ , а на рис. 3 – добовий фрагмент збережених хвильових форм.

Рис. 3 демонструє, що в умовах рівня сейсмічного шуму, характерного для населеної місцевості, діапазон частот можна розширити до 0,1–5 Гц за умови, що амплітуда сигналу більше рівня шуму в кілька разів (епіцентр підземного поштовху розташовувався за 67 км на північний захід від м. Галац у Румунії, тобто на відстані 480 км від ст. Carp-Lviv-2, глибина гіпоцентра становила 54 км, магнітуда – 4,9 бали за шкалою Ріхтера).

Отже, за допомогою запропонованої методики робоча смуга частот інженерних сейсмометрів СМ-3 може бути гранично розширена до 0,1 Гц при реєстрації сейсмічних коливань із амплітудами вище ніж 0,3 мкм/с, що дозволяє застосовувати його у наднизькочастотній ділянці спектра.

Адаптовано до використання методику електронного корегування первинних датчиків СМ-3 із метою розширення робочого діапазону частот сейсмічного вимірювального каналу. При дослідженні отриманих хвильових форм експериментально визначені межі застосування методики з урахуванням умов проведення вимірів для розширення можливостей сейсмічних спостережень при розв'язанні визначеного кола геофізичних завдань.

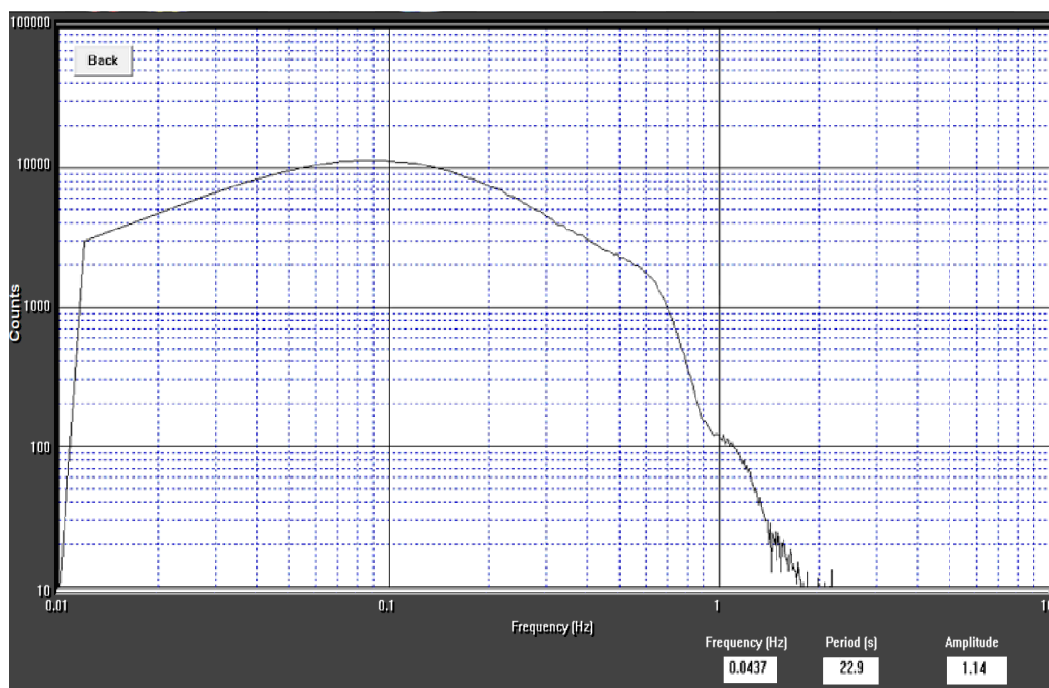


Рис. 2. АЧХ сейсмічного каналу  $Z$  із коректованим СМ-3

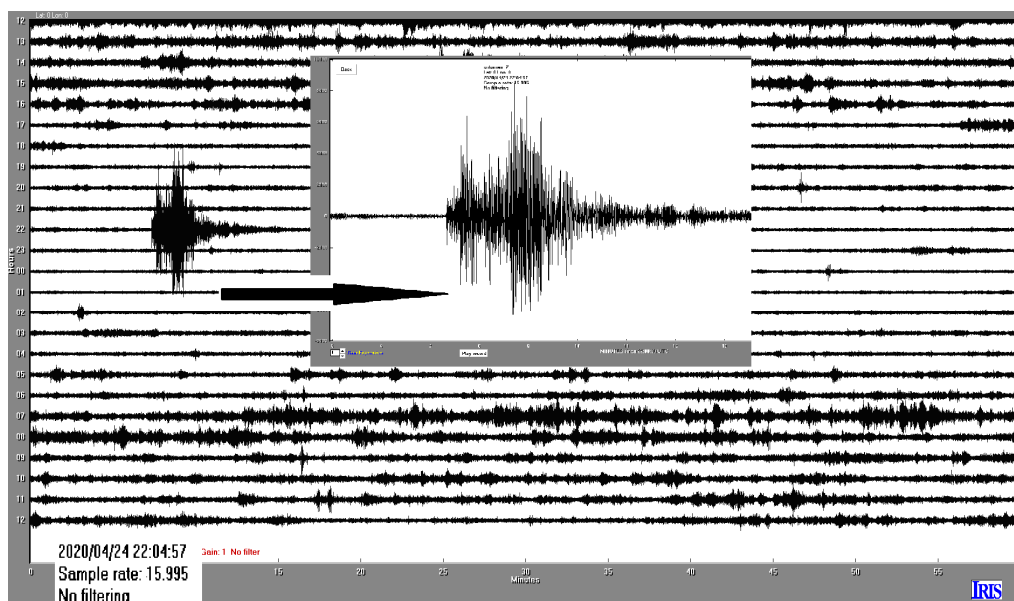


Рис. 3. Амплітудні складові добового ряду спостережень і час реєстрації приходу хвиль землетрусу на станцію Carp-Lviv-2, зафіксовані сейсмометром CM-3 із коректованим АЧХ

**Висновки.** Підвищення рівня чутливості системи реєстрації у низькочастотній області дозволяє досліджувати приуроченість мікроземлетрусів до різномасштабних геологічних структур при підвищеному рівні шуму й оцінити параметри сейсмічного режиму, контролювати розвиток природних карстових явищ і техногенних тріщин та деформацій, визначати можливі джерела виникнення помилок при оцінюванні характеристик вогнищ слабких сейсмічних подій у низькочастотній області спектра. Результати комплексної сейсмоакустичної методики моніторингу дозволяють проводити спільний аналіз даних сейсмічних і геоакустичних спостережень та визначати особливості відгуку процесів напружень деформацій у досліджуваному регіоні. Для впевненого контролю території система моніторингу забезпечує реєстрацію слабких сейсмічних подій із магнітудами  $M \geq 2$ . На підставі аналізу результатів обробки сигналів реєстрації землетрусів, здійснених експериментально портативною сейсмоакустичною апаратурою на контрольному пункті – обсерваторії "Яноші", розташованому в районі Закарпатського прогину, встановлено, що широкорозповсюджені інженерні датчики CM-3 із коректованими частотними характеристиками в деяких випадках можуть замінити нестачу дорогих низькочастотних геофонів. Головним дестабілізуючим фактором є коливання температури середовища, яку необхідно постійно контролювати. Надалі для встановлення кількісних залежностей необхідно продовжити розширення бази даних як слабких, так і високомагнітудних сейсмічних подій. Отримані результати можуть стати інформаційно-аналітичною підтримкою для прийняття рішень у сфері екологічної безпеки та раціонального використання коштів.

У майбутньому планується провести граничне електронне і програмне корегування хвильових форм диференціальних сейсмоматчиків СГ-5 для вимірювання рівня механічних шумів рухомої системи маятника і вивчити можливість дослідження хвильових форм гравітаційного сонячно-місячного припливоутворювального потенціалу.

#### Список використаних джерел

Беседина, А.Н., Кабыченко, Н.В. (2011). Исследование сейсмических колебаний в длиннопериодной части спектра. Том 3. Аэрокосмические исследования, прикладная механика. ТРУДЫ МФТИ, 51.

Кравець, С., Малицький, Д., Микита, А. (2019). Інструментальні дослідження сейсмоакустичного випромінювання у геосередовищі. Зб. матеріалів VII Міжнар. наук. конф. Геофізика і геодинаміка: прогнозування та моніторинг геологічного середовища, 24–26 верес. 2019 р., Львів, 74–78.

Латынина, Л.А. (2007). Изучение современных движений земной коры по данным подземных деформационных станций. Геодинамика, 1(6).

Малицький, Д.В., Кравець, С.В. (2010). Аналіз деформографічних спостережень у Закарпатті. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 48, 48–52.

Немчинов, Ю.І., Хавкін, О.К., Мар'єнков, М.Г., Жарко, Л.О., Дунін, В.А., Бабік, К.М. (2013). Практичні питання динаміки будівель. Будівництво України, 6, 6–21.

Рыков, А.В. (1963). Влияние обратной связи на параметры маятника. Известия АН СССР. Серия геофизическая, 7.

Рыков, А.В. (1972). Моделирование сейсмометра. Сейсмические приборы, 6, 32–34.

Сасорова, Е.В., Левин, Б.В. (1999). Низкочастотные сейсмические сигналы, как региональные признаки подготовки землетрясения. Вулканология и сейсмология, 4–5, 126–133.

Якимов, А.В. (2013). Физика шумов и флуктуации параметров. Электронное учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет.

Al-Alaoui, M.A. (2001). Low-frequency differentiators and integrators for biomedical and seismic signals. Circuits and systems I: fundamental theory and applications. IEEE Transactions on., 48, 8, 1006–1011.

Havskov, J., Alguacil, G. (2002). Instrumentation in Earthquake Seismology. Springer Dordrecht. University of Bergen Department of Earth Science Bergen, Norway Gerardo Alguacil Andalusian Institute of Geophysics and Earthquake Disaster Prevention University of Granada Granada, Spain.

#### References

Al-Alaoui, M.A. (2001). Low-frequency differentiators and integrators for biomedical and seismic signals. Circuits and systems I: fundamental theory and applications. IEEE Transactions on., 48, 8, 1006–1011.

Besedina, A.N., Kabychenko, N.V. (2011). Issledovaniye seysmicheskikh kolebaniy v dlinnoperiodnoy chasti spektra. TRUDY MFTI. Tom 3. Aerokosmicheskiye issledovaniya. prikladnaya mekhanika, 51. [in Russian]

Havskov, J., Alguacil, G. (2002). Instrumentation in Earthquake Seismology. Springer Dordrecht. University of Bergen Department of Earth Science Bergen, Norway Gerardo Alguacil Andalusian Institute of Geophysics and Earthquake Disaster Prevention University of Granada Granada, Spain.

Kravets, S., Malytskyi, D., Mykyta, A. (2019). Instrumentalni doslidzhennia seismoakustychnoho vyprominiuvannia u heoseredovyschchi. Zb. materialiv VII Mizhnar. nauk. konf. Heofizika i heodynamika: prohnouzuvannia ta monitorynh heolohichnoho seredovyschcha. 24–26 veres. 2019 r., Lviv, 74–78. [in Ukrainian]

Latynina, L.A. (2007). Izucheniyе sovremennykh dvizheniy zemnoy kory po dannym podzemnykh deformatsionnykh stantsiy. Geodinamika, 1(6). [in Russian]

Malytskyi, D.V., Kravets, S.V. (2010). Analiz deformografichnykh sposterezen u Zakarpatti. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 48, 48–52. [in Ukrainian]

Nemchyinov, Yu.I., Khavkin, O.K., Marienkov, M.H., Zharko, L.O., Dunin, V. A., Babik, K. M. (2013). Praktychni pytannia dynamiky budivel. Budivnytstvo Ukrainy, 6, 6–21. [in Ukrainian]

Rykov, A.V. (1972). Modelirovaniye ceysmometra. *Seysmicheskiye pribory*, 6, 32-34. [in Russian]

Rykov, A.V. (1963). Vliyaniye obratnoy svyazi na parametry mayatnika. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geofizicheskaya*, 7. [in Russian]

Sasorova, E.V., Levin, B.V. (1999). Nizkochastotnyye seysmicheskiye signaly. kak regionalnyye priznaki podgotovki zemletryaseniya. *Vulkanologiya i seysmologiya*, 4-5, 126-133. [in Russian]

Yakimov, A.V. (2013). Fizika shumov i fluktatsii parametrov. Elektronnoye uchebnoye posobiye. Nizhniy Novgorod. Nizhegorodskiy gosuniversitet. [in Russian]

Надійшла до редколегії 19.05.22

S. Kravets, Cand. Sci. (Geol.), Leading Researcher,

E-mail: sergiy@cb-igph.lviv.ua;

D. Malytsky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,

E-mail: dmalytsky@gmail.com;

O. Astashkina, Cand. Sci. (Geol.), Researcher,

E-mail: sac1@ukr.net;

Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine,

3-b Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine

## ACTUAL APPROACHES TO THE ADAPTATION OF SEISMIC SENSORS FOR THE MAN-CAUSED TERRITORIES

*The article is devoted to the elucidation of experimentally tested methods for correcting the frequency range, amplitudes and noise levels for seismic sensors. Increasing the level of sensitivity of the registration system in a certain frequency range allows flexibly and in a short time to study the timing of microearthquakes in different geological structures and assess seismic parameters, control the development of natural karst phenomena and man-made cracks and deformations. The method of expanding the limits of application of common seismic transmitters type SM-3 and (SM-3 KV) in the seismic channels of portable seismic stations used in Ukraine is presented to solve a number of problems of seismology in technogenic-loaded regions with a high level of industrial average daily noise components.*

*The article presents some results of registration of seismic signals performed by the information collection system using additional corrected seismic sensors SM-3 with extended frequency range in the low frequency range of the spectrum 0.1–3 Hz, installed at Carp-Lviv-2.*

**Keywords:** seismic event, engineering-geophysical researches, spectral-temporal analysis, seismic monitoring, temporary point of seismic observations.

UDC 593.98

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.04>

S. Gahramanli,  
E-mail: [sevilgahramanli1965@gmail.com](mailto:sevilgahramanli1965@gmail.com);  
Institute of Oil and Gas of Azerbaijan National Academy of Sciences,  
9, F. Amirov Str., Baku, Azerbaijan

## RESULTS OF GEOPHYSICAL MONITORING OF THE DEVELOPMENT OF THE HORIZON PK-2 OF THE PODKIRMAKINSKY SUITE OF THE NEFT DASHLARY FIELD

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

*The article is devoted to the study of the current state of development of the second horizon of the Podkirmakinsky suite (PK-2) of the Productive stratum (PS) of the Neft Dashlary field, which has been in operation for more than 60 years.*

*The results of the study by the method of complex areal interpretation of geophysical survey data of wells and geological and field information are presented. Three-dimensional geo models, built on the basis of petrophysical parameters obtained after the interpretation of geophysical and geological data using the DV Seys Geo program are given in the article.*

*The results of the analysis of the state of water impact are presented, the values of the oil saturation factor during well drilling are summarized, the values of the current oil saturation factor are calculated taking into account the extraction of oil, the results of studying the nature of saturation of reservoirs in the context of production wells by the method of pulsed neutron logging (PNL), as well as a comparative analysis of these values along the horizon PK-2 of the PS of the Neft Dashlary field.*

**Keywords:** field, horizon, reservoir, exploration, development, area, interpretation, porosity, oil saturation, geomodel.

**Introduction.** In the 1950–1960s, in the oil industry system of Azerbaijan and in the former Soviet Union, taking economic factors as a basis, when developing oil deposits, there was a tendency to combine several interlayers with different hydrodynamic characteristics and reservoir properties into a single object. For this reason, the coverage of the productive section by active development has significantly decreased (Alizade et al., 1985; Alikhanov, 1964).

Consequently, science and industry faced the issue of geological and technological solutions, in order to involve the entire productive section in the active development. In this regard, the issue of determining the operational characteristics of interlayers included in a single development object was acute in order to increase their ultimate oil recovery.

The solution of these problems required the creation of an information base on the state of their development for individual wells and for the object as a whole (Gadzhiev, 2012; Zhemzhurova et al., 2012).

Against the background of the intensification of the use of an effective development system, methods of intensifying oil production, and methods of influencing the reservoir at various stages of development, a comprehensive areal interpretation of geophysical, hydrodynamic, and geological and field information remained in the shade. In contrast to previous years, in recent years, the volume of studies of wells and reservoirs by geophysical and hydrodynamic methods has significantly increased in order to study the dynamic process taking place in the development object.

However, the effectiveness of such studies should not be limited to the collection of information on wells to create various methods and improve the complexity of well and reservoir studies. Their usefulness is determined by the use of the obtained results of well surveys in the control of the development and during the issuance of sound recommendations for the regulation of this process.

Among such studies, the most important place is occupied by field geophysical and hydrodynamic methods to determine the nature of reservoir saturation, providing tracking of the dynamic process at various stages of oil and gas field development (Lebedev et al., 1976).

The complexity of the geological structure, the heterogeneity of productive formations, the multilayer nature of development objects, the change in the modes of oil extraction and water injection into the reservoir, and the

underestimation of the structural features and properties of the deposit, lead to incomparability of the calculated and actual development indicators.

In the long-term practice of developing multi-layer oil fields, there has been a certain disproportion between the study of the process and the accumulation of information on wells with graphical constructions reflecting the state of development of the object in which this process takes place, based on a comprehensive areal interpretation of geophysical and geological field data from good studies.

**The object of study.** All these above-mentioned problems are typical for all multilayer and complex geological structure oil and gas fields, including the Podkirmakinsky (PK) suite, as well as the horizon PK-2 of the Productive stratum (PS) of the Neft Dashlary field in the South Caspian Basin, which is an object of our research.

The Neft Dashlari field was discovered in 1949 and has been developed since 1950. For more than 70 years, the productive facilities of the PK suite of the PS, where the main oil reserves are concentrated, have also been in operation. The PK Formation is represented by four horizons: PK-1v, PK-1, PK-2, and PK-3.

The Neft Dashlari field has a complex geological structure and in tectonic terms this field is an asymmetric brachianticline, complicated by numerous faults, dividing it into 6 tectonic blocks.

The oil content is confined to the PS deposits of the Middle Pliocene, among which the object of study PK-3 is lithologically represented by a member of gray sands and sandstones. Clay layers make up to 30% of the object's thickness; clays are highly sandy. The apparent resistivity values reach 100–200 Ohm·m and are characterized by a well-differentiated PS curve (well potential). Sand content is 70% and decreases from the arch to the wings. Oil-bearing horizons are established in all tectonic blocks.

The object of study is the second horizon of the Podkirmakinsky suite (PK-2) of the Productive stratum of the Neft Dashlary field, which has been in operation since 1950 (Fig. 1).

Due to the tectonic pressure that took place in the area of the deposit, it was divided into 6 blocks by longitudinal and transverse faults. Each of them went into active development, ranging from 1–7 to years. With the exception of block 1a, which began operation in 1977.

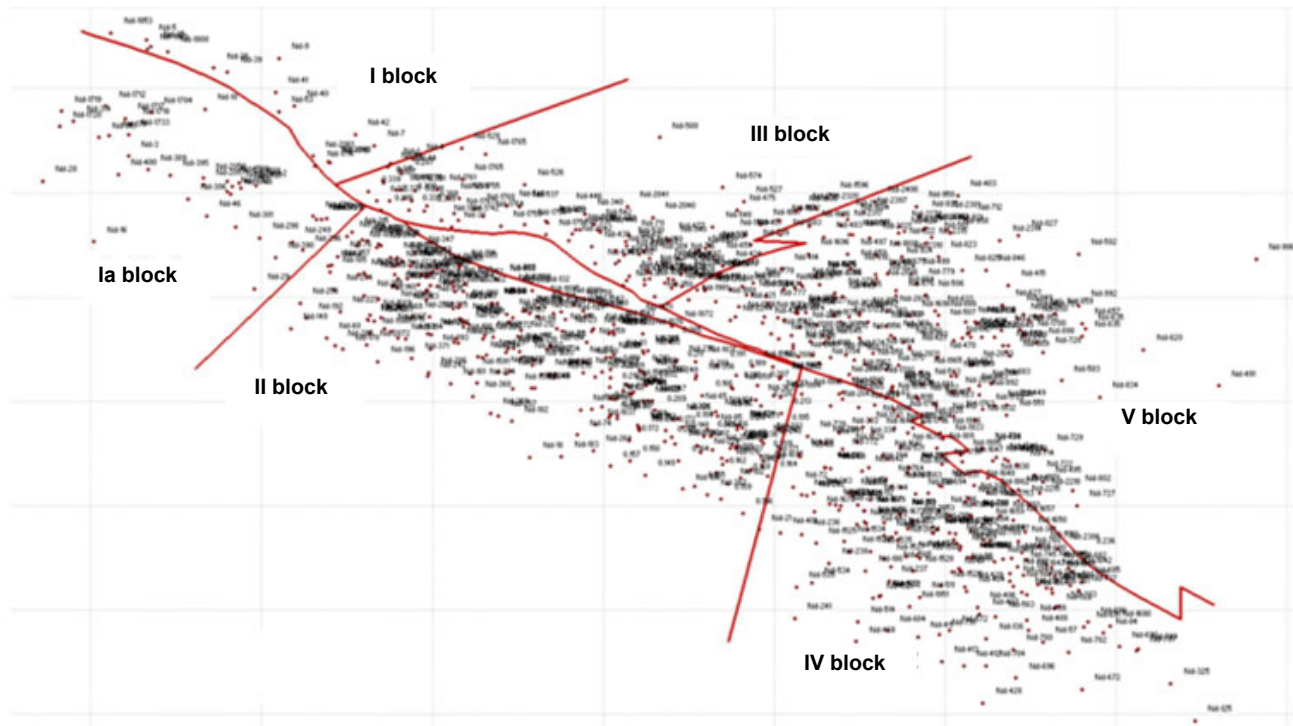


Fig. 1. Development map of the Neft Dashlary field

During operation, in all tectonic blocks out of 841 drilled wells, the horizon PK-2 was penetrated in the section of 465 wells.

Study of the object of research and analysis of the results. The study of the current state of the development of PK-2 by the method of complex areal interpretation and the DV-Seys Geo program was carried out according to the logging data of the values of petrophysical parameters in the section of 465 wells.

The resulting values of porosity and oil saturation of the PK-2 reservoirs are analyzed and generalized for tectonic blocks and their geomodels are built.

According to the interpretation, the values of reservoir porosity vary between 16-32%, where the average value is 24%. At the same time, a significant oil-saturated area is characterized by a reservoir porosity value in the range of 20-25%, and a certain part of the area is represented by reservoirs with a porosity of less than 20%. This is well observed in the first constructed geomodels of porosity, shown in Fig. 2.

Of considerable interest are the results of the interpretation of well logging data to determine the values of oil saturation of reservoirs by the time of drilling wells. After summarizing the interpretation results, the oil saturation values were grouped. The first group includes collectors with a value of up to 0.6, the second – with a value from 0.601 to 0.7, and the third – with more than 0.7. For wells with determining oil saturation values, for the first time, a geomodel was built, shown in Fig. 3, which clearly illustrates the changes in values over the area of the object of study.

In the next stage, the study of the current state of the development of oil reserves for PK-2 was carried out. To do this, we used method of complex areal interpretation of geological and field information on oil extraction, taking into account the phased perforation of the object and GWS data (geophysical well survey), accumulated during the control of development in the section of wells, the values of the coefficient of residual oil saturation of reservoirs from the initial one, taking into account oil production at the time of the analysis.

Based on the results of the generalization of the obtained values about the current oil saturation of reservoirs, a geo-model was built for the first time (Fig. 4). In recent years, in the context of a temporarily stopped production well at the horizon PK-2, in order to determine the value of the current oil saturation, studies were carried out using the PNNL method (pulse-neutron-neutron logging).

After interpreting the PNNL materials, the actual values of oil saturation were compared with the values of the current oil saturation, determined by calculation as a result of a comprehensive areal interpretation of well logging data and geological and field information, taking into account oil recovery. The results of these comparisons are presented in Table 1.

As it can be seen from the geomodel and presented in Table 1, compiled on the basis of the actual results of well surveys using the PNL method (pulsed neutron-neutron logging), there is a very good convergence of these values, thus showing the real resolving capabilities of the method of integrated areal interpretation of geophysical and geological and field information for the study of the development process of the object.

Horizon PK-2 of the PS, mainly except the first, is being developed in all tectonic blocks. Active development of the object is observed in the II and V tectonic blocks. The pace is somewhat lower in blocks III and IV. The process is going on passively in the tectonic block Ia.

During the period of water impact on 5 injection wells, a total of 4716 thousand m<sup>3</sup> of water was pumped. Injected water flooded 122 thousand m<sup>3</sup>, where the flooding coverage of the entire oil-saturated area is 4%.

Limiting itself to a detailed description of the state of development of the PK-2 of the PS for tectonic block II, the results of the remaining blocks are presented in Table 2. I would like to note that, in general, the methodological approach to studying the current state is presented with more objective information when evaluating the development process based on actual data of petrophysical parameters and

dynamic processes associated with oil recovery, from the applied technological methods of operation and impact.

As a result, the results of the analysis provide more scientifically based information and direction for improving and regulating the development process of the object, achieving

a high oil recovery factor of the object when extracting the residual reserve.

The initial balance oil reserve was calculated based on an in-depth analysis of the state of development using updated data on the PK-2 of the PS horizon within the oil-saturated area.

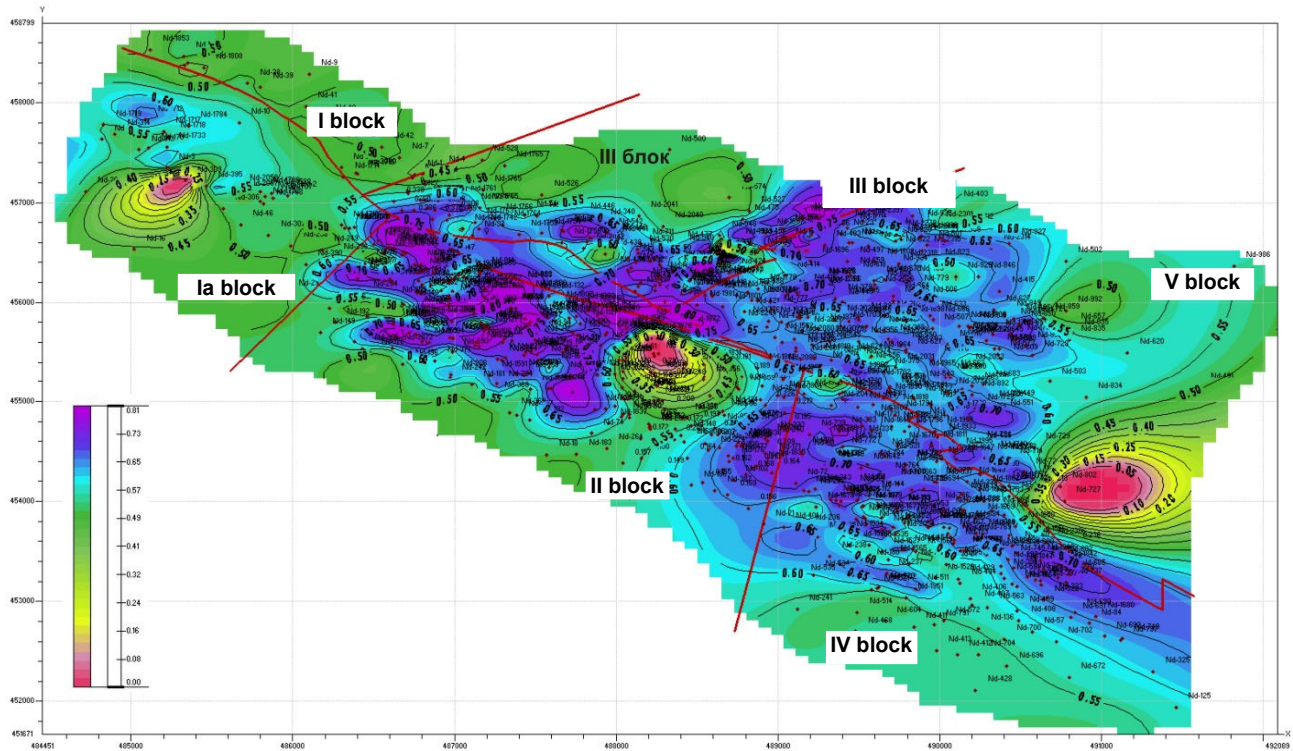


Fig. 2. Porosity change geomodel

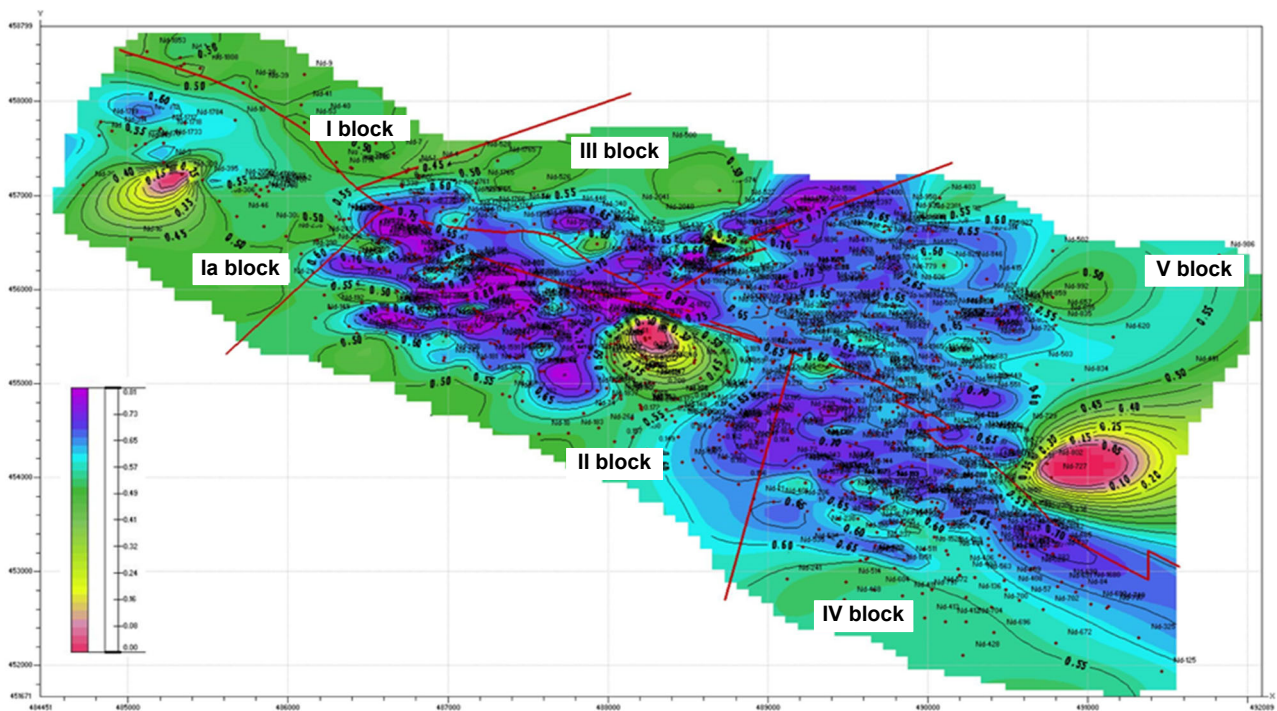


Fig. 3. Geomodel of initial oil saturation change

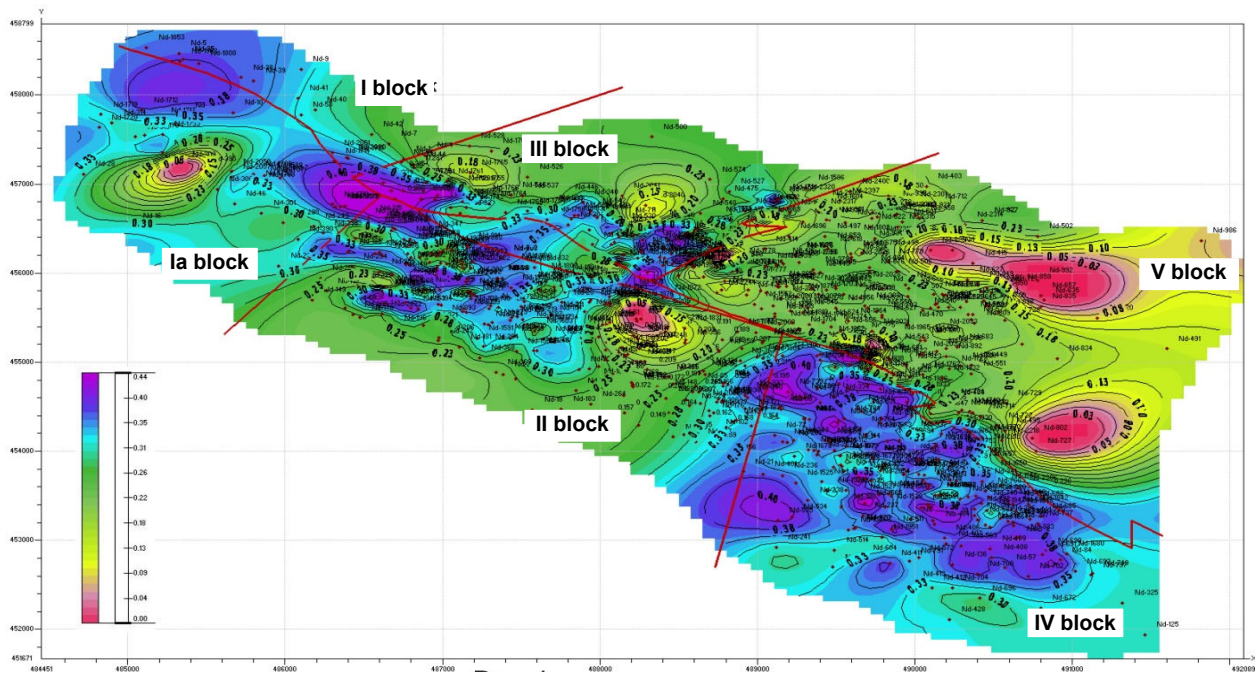


Fig. 4. Geomodel of current oil saturation change

Table 1

Comparison of oil saturation values of reservoirs, the study by the methods of PNNL and integrated areal interpretation of electrical logging data for wells of the PK-2 PT horizon of the Neft Dashlary field

| Tectonic block | Well № | Date of the study by the PNNL method | Oil-saturated interval | Intensity in imp/min | Oil saturation values in conditional units |                                                                 |
|----------------|--------|--------------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                |        |                                      |                        |                      | By PNNL                                    | By complex areal interpretation of EL data (electrical logging) |
| Ilf            | 1715   | 28/01/1984                           | 473-488                | 616                  | 0.5                                        | 0.48                                                            |
| Ilf            | 2059   | 17/02/1984                           | 377-408                | 849                  | 0.65                                       | 0.57                                                            |
| Ild            | 108    | 22/04/1985                           | 915-920                | 886                  | 0.67                                       | 0.61                                                            |
| Ild            | 141    | 10/07/1987                           | 1009-1029              | 445                  | 0.36                                       | 0.42                                                            |
| Ild            | 1563   | 15/08/1984                           | 589-639                | 1617                 | 0.78                                       | 0.69                                                            |
| Ild            | 1589   | 23/08/1986                           | 1110-1141              | 976                  | 0.69                                       | 0.64                                                            |
| Ild            | 2027   | 10/04/1985                           | 625-640                | 568                  | 0.46                                       | 0.48                                                            |
| Ile            | 61     | 22/03/1987                           | 641-658                | 597                  | 0.49                                       | 0.42                                                            |
| Ilf            | 1837   | 07/07/1984                           | 1136-1161              | 1068                 | 0.82                                       | 0.79                                                            |
| Ilf            | 1839   | 18/06/1985                           | 985-1000               | 802                  | 0.71                                       | 0.65                                                            |
| Ilf            | 1840   | 07/06/1984                           | 1050-1086              | 1392                 | 0.75                                       | 0.71                                                            |
| Ilg            | 2257   | 05/03/1984                           | 474-486                | 1760                 | 0.8                                        | 0.76                                                            |
| Ilh            | 2007   | 18/04/1984                           | 997-1032               | 1455                 | 0.76                                       | 0.68                                                            |
| Ilk            | 1832   | 04/11/1988                           | 1058-1075              | 1921                 | 0.82                                       | 0.74                                                            |
| Ilk            | 1833   | 13/09/1984                           | 1139-1159              | 1607                 | 0.78                                       | 0.7                                                             |
| Ilk            | 1836   | 03/10/1984                           | 919-934                | 1603                 | 0.78                                       | 0.75                                                            |
| Va             | 2313   | 15/04/1990                           | 1864-1910              | 1030                 | 0.7                                        | 0.65                                                            |
| Vd             | 1736   | 22/08/1985                           | 1066-1104              | 1964                 | 0.83                                       | 0.8                                                             |
| Vd             | 1810   | 13/10/1987                           | 1110-1139              | 396                  | 0.32                                       | 0.36                                                            |
| Vd             | 2274   | 13/08/1986                           | 1314-1360              | 795                  | 0.71                                       | 0.72                                                            |
| Vn             | 2172   | 30/07/1987                           | 1711-1730              | 898                  | 0.67                                       | 0.67                                                            |

Table 2

Summary indicators of summarizing the results of the study by the method of integrated areal interpretation of geophysical data from wells of the state of development of the horizon PK-2 of the Neft Dashlary field

| Tectonic block | Horizon | Oil-saturated area (thousand m <sup>2</sup> ) | Number of wells          |           |               | Thickness (m) |            | Porosity, fractions of units | Initial oil saturation, fractions of units | Oil density g/cm <sup>3</sup> | Balance oil reserve, thousand m <sup>3</sup> | Total oil production thousand m <sup>3</sup> | Total water injection, thousand m <sup>3</sup> | Current oil recovery | Conversion coefficient | Remaining oil reserves, thousand m <sup>3</sup> | Flooding area, thousand m <sup>2</sup> | Injection water flood coverage, % |
|----------------|---------|-----------------------------------------------|--------------------------|-----------|---------------|---------------|------------|------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
|                |         |                                               | With effective thickness | Operating | Not operating | Effective     | Perforated |                              |                                            |                               |                                              |                                              |                                                |                      |                        |                                                 |                                        |                                   |
| Ia             | PK-2    | 120                                           | 5                        | 1         | 1             | 13.8          | 16         | 0.21                         | 0.686                                      | 0.9                           | 213                                          | 12                                           | —                                              | 0.056                | 0.85                   | 201                                             | —                                      | —                                 |
| II             | PK-2    | 3020                                          | 151                      | 50        | 2             | 5             | 10.5       | 0.27                         | 0.776                                      | 0.9                           | 5823                                         | 3657                                         | 4716                                           | 0.628                | 0.89                   | 2166                                            | 122                                    | 4                                 |
| III            | PK-2    | 1050                                          | 65                       | 47        | 1             | 2             | 23.4       | 0.24                         | 0.738                                      | 0.9                           | 3894                                         | 1696                                         | 3499                                           | 0.436                | 0.89                   | 2198                                            | 350                                    | 33                                |
| IV             | PK-2    | 3000                                          | 106                      | 48        | —             | 12            | 14.3       | 0.24                         | 0.73                                       | 0.9                           | 6607                                         | 1954                                         | 4388                                           | 0.296                | 0.88                   | 4653                                            | 1057                                   | 35                                |
| V              | PK-2    | 2970                                          | 138                      | 82        | 2             | 13            | 21.4       | 0.26                         | 0.734                                      | 0.9                           | 10480                                        | 7323                                         | 9975                                           | 0.699                | 0.91                   | 3157                                            | 650                                    | 22                                |

**Conclusions.** Summarizing the results of studying the state of development, we can draw the following conclusions:

- Not in all tectonic blocks, the horizon PK-2 is involved in active development, where the oil recovery factor is: in I<sup>a</sup> – 0.5%, in IV – 29.6%, in block V – 69.9%. Block I does not participate in the selection at all.
- Low flood coverage from injected water, where in II tectonic block is 4%, in III and IV blocks, respectively, 33% and 35%.
- For the first time, geomodels were built for the horizon PK-2 of the PS using petrophysical parameters: porosity, initial and current oil saturation.
- Based on the obtained data on the horizon PK-2 of the PS within the oil-saturated area, the balance oil reserve was adjusted.

С. Гахраманли,  
E-mail: sevilgahramanli1965@gmail.com.  
Інститут нафти і газу Національної академії наук Азербайджану,  
вул. Ф. Амірова, 9, Баку, Азербайджан

#### References

- Alizade, A.A., Salaev, S.G., Aliyev, A.I. (1985). Scientific assessment of the prospects of oil and gas potential of Azerbaijan and the Southern Caspian Sea and the direction of prospecting and exploration. Baku: Elm, 248 p. [in Russian]
- Alikhonov, E.N. (1964). Oil and gas fields of the Caspian Sea. Baku: Azorneft, 383 p. [in Russian]
- Hajiyev, Ch.A. (2012). An improved method of areal interpretation based on geophysical and geological field information to assess the state of development of oil and gas fields. Methodical manual. Baku: Nafta-Press, 17 p. [in Russian]
- Zhemzhurova, Z.N., Chekunova, V.A., Chernoglazov, V.N. (2012). Workshop on geological and geophysical modeling of oil and gas deposits under development: textbook. Moscow: Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 206 p. [in Russian]
- Lebedev, L.I., Kulakova, L.S. (1976). Geological structure and oil and gas potential of the platform part of the Caspian Sea. Moscow: Nauka, 127 p. [in Russian]

Надійшла до редколегії 28.05.22

### РЕЗУЛЬТАТИ ГЕОФІЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ РОЗРОБЛЕННЯ ГОРИЗОНТУ ПК-2 ПІДКИРМАКІНСЬКОЇ СВИТИ РОДОВИЩА НАФТИ ДАШЛАРИ

*Присвячено вивченню поточного стану розроблення другого горизонту Підкирмакінської світи (ПК-2) продуктивної товщі (ПТ) родовища нафти Дашлари, що перебуває більш ніж у 60-річній експлуатації.*

*Наведено результати вивчення методом комплексної площинної інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин та геолого-промислової інформації. Описано тривимірні геомоделі, побудовані за петрофізичними параметрами, отриманими після інтерпретації матеріалів геофізичних і геолого-промислових даних за програмою DV Seys Geo. Представлено результати аналізу стану водного впливу, узагальнено значення коефіцієнта нафтонасиченості при бурінні свердловин, розраховано значення коефіцієнта поточної нафтонасиченості з урахуванням відбору нафти, наведено результати вивчення методом імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу характеру насичення колекторів у розрізі видобувних свердловин по горизонту ПК-2 ПТ родовища Дашлари.*

*Ключові слова: родовище, горизонт, колектор, дослідження, розроблення, площа, інтерпретація, пористість, нафтонасиченість, геомодель.*

## ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553 (477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.05>

В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: [vladvam@gmail.com](mailto:vladvam@gmail.com);

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: [vsa@univ.net.ua](mailto:vsa@univ.net.ua);

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

С. Паюк, голова,

Державна комісія України по запасах корисних копалин,

вул. Ген. Алмазова, 18/7, оф. 816, м. Київ, 01133, Україна

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ МІНЕРАЛЬНО-СИРОВИННОЇ БАЗИ  
СТРАТЕГІЧНИХ КОРИСНИХ КОПАЛИН УКРАЇНИ

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

Здійснено системний аналіз мінерально-сировинної бази (МСБ) стратегічно важливих для економіки України корисних копалин. Виділено чотири категорії стратегічних корисних копалин за їхньою інвестиційною привабливістю: традиційні (залізо, марганець, титан, уран, каолін, піски формувальні, будівельне й облицювальне каміння, глина тугоплавка); високоперспективні (рідкісні землі, цирконій і гафній, літій, скандій, германій, графіт, солі калійні, абразивна сировина (гранат), кварцова сировина, сировина п'єзооптична); перспективні (нікель, кобальт, хром, алюміній, мідь, тантал і ніобій, берилій, золото, фосфорити, апатит, плавиковий шпат, глауконіт, флюсові вапняки і доломіти, вапняки для цукрової промисловості, бентонітові глини, польовошпатові сировина, каменебарвна сировина); з невиясненими перспективами (ванадій, свинець і цинк, вольфрам, молибден, платина і платиноїди, стронцій, магній, миш'як, рубідій, цезій, барит, бор, давсоніт, бром і йод, мінеральні сорбенти, високоглиноземиста сировина, алмаз, сировина для виробництва мінеральних фарб, фтор, сірка). Визначено чинники і критерії інвестиційної привабливості та проведено її експертне оцінювання для родовищ металічних і неметалічних корисних копалин України, показано шляхи створення гармонійно розвинутої, збалансованої МСБ стратегічних корисних копалин.

**Ключові слова:** мінерально-сировинна база; родовище, стратегічні корисні копалини, інвестиційна привабливість.

**Постановка проблеми.** Експлуатація об'єктів мінерально-сировинної бази (МСБ) для України є стратегічною задачею, яка має не тільки важливе економічне, але й політичне значення, оскільки Україна належить до країн із розвинутою МСБ, розроблення якої багато в чому забезпечує не тільки наповнення державного бюджету, але й саме існування держави. Особливого значення набуває питання залучення інвестицій у розвиток МСБ корисних копалин України з оглядом на майбутнє відродження економіки нашої країни.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання стратегічно важливих для економіки України корисних копалин розглядалося в роботах багатьох дослідників (О. К. Бабинін, О. Х. Бакаржєв, В. З. Бартошинський, Я. М. Бєлєвцев, О. Б. Бобров, В. П. Бордюгов, Л. В. Бочай, А. С. Войновський, Л. С. Галєцький, П. Ф. Гожик, К. Ю. Єсипчук, В. М. Загнітко, О. І. Зарицький, В. Б. Коваль, Є. О. Куліш, М. І. Лебідь, О. І. Матковський, В. С. Металіді, С. В. Нечаєв, Б. С. Панов, В. Л. Приходько, В. В. Покалюк, М. П. Семененко, А. О. Сіворонов, В. І. Скаржинський, Ю. І. Третьяков, Є. Ф. Шнюков, В. О. Шумлянський, М. П. Щербак, Г. М. Яценко та ін.), але найбільш повною і концептуальною роботою є монографія Д. С. Гурського – багаторічного керівника Державної геологічної служби і неперевершеного знавця МСБ України (Гурський, 2008). У ній автор визначив стратегічно важливі для економіки країни корисні копалини як види сировини, використання яких забезпечує приріст внутрішнього валового продукту, валютні надходження, наповнення державного бюджету, економічну й оборонну безпеку країни. Стратегічно важливі корисні копалини були поділені автором на чотири категорії:

• **А** – інтенсивно видобуваються в Україні, мають значні розвідані запаси, забезпечують наповнення

державного бюджету (залізо, марганець, титан, магній, газ, нафта, конденсат, метан вугільних родовищ, вугілля);

• **Б** – видобуваються в обмежених обсягах, розвідані запаси невеликі чи виснажені, нові родовища недостатньо вивчені, але користуються великим попитом (алюміній, нікель, кобальт, уран, калійні солі, сірка, карбонатна сировина для цукрової промисловості, каолін);

• **В** – родовища в Україні наявні, запаси їх, у тому числі значні, розвідані, але сировина видобувається в обмежених обсягах або не видобується взагалі (літій, рідкісні землі, золото, срібло, флюсові вапняки і доломіти, бентонітові глини);

• **Г** – родовища в Україні не розробляються і недостатньо вивчені, але можуть стати стратегічно важливими для економіки держави у близькій перспективі (хром, мідь, свинець, цинк, тантал і ніобій, олово, вольфрам, молибден, цирконій і гафній, платина і платиноїди, фосфорити, апатит, барит, глауконіт, флюорит, магнезит, високоглиноземиста сировина – силіманіт, дистен, андалузит; каменебарвна сировина – бурштин, топаз, берил, гірський кришталі тощо; алмаз, техногенна сировина).

В інших роботах детально описано структуру МСБ України, особливості будови рудних районів і родовищ корисних копалин (Гурський та ін., 2006<sup>1,2</sup>; Михайлов та ін., 2007, 2008, 2014, 2018; Cune et al., 2011; Mykhailov, Hrinchenko, 2018), проведено геолого-економічне оцінювання об'єктів МСБ України (Гурський, 2008; Довгий та ін., 2007; Михайлов, Курило, 2010, Рудько та ін., 2010, 2011, 2015; Mykhailov, Kurylo, 2015), розроблено основні принципи оцінювання їхньої інвестиційної привабливості (Михайлов та ін., 2017).

**Виділення нерозв'язаних раніше аспектів загальної проблеми.** Більшість перелічених робіт містять загальну оцінку МСБ України та її окремих складових, але з погляду їхнього кількісного і якісного оцінювання,

геологічних передумов і закономірностей розповсюдження родовищ і проявів корисних копалин. Частково в публікаціях зустрічаються результати геолого-економічного оцінювання запасів і ресурсів корисних копалин, але зазвичай це результати нормативного або порівняльного оцінювання, яке не містить детального інвестиційного аналізу проектів використання надр. Відсутні системний аналіз стратегічних корисних копалин України та їхнє ранжування за інвестиційною привабливістю.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є системний аналіз МСБ стратегічних корисних копалин України і оцінювання родовищ металічних і неметалічних корисних копалин за їхньою інвестиційною привабливістю.

**Викладення основного матеріалу.** В останні роки в Європі та інших країнах світу інтенсивно обговорюються питання щодо так званої критичної мінеральної сировини, до якої належать такі корисні копалини, які, з одного боку, необхідні для забезпечення економічної і національної безпеки певної країни, є ключовими у виробничих і сільськогосподарських ланцюгах, а також для впровадження сучасних технологій, а з іншого, – ці країни не забезпечені чи забезпечені не повною мірою власним видобутком, тобто залежать від імпорту із третіх країн (Політика США..., 2019; Bartekova, Kemp, 2016; Canada releases..., 2021; Canada's list..., н.д.; Communication from..., 2020; Critical and Strategic..., н.д.; Critical commodities..., н.д.; Critical raw materials..., н.д.; European Commission..., 2020, 20201; Global Mineral..., 2021; The methodology..., н.д.; Towards a Historical..., 2018). До критичної сировини в різних країнах відносять рідкісноземельні елементи (РЗЕ), галій, індій, вольфрам, мінерали платинової групи (МПГ), кобальт, ніобій, магній, молибден, сурму, літій, ванадій, нікель, тантал, телур, хром, марганець тощо. Зазвичай ці мінерали й елементи широко використовують у сучасних високотехнологічних галузях. В Україні до критичної сировини віднесені такі корисні копалини: природний газ, нафта, уран, коксівне й антрацитове кам'яне вугілля, руди

алюмінію, вольфраму, міді, свинцю, цинку, нікелю, літію, танталу, ніобію, хрому, кобальту, магнію, МПГ тощо (Проект закону..., 2021; Проект Кодексу..., 2021).

Безумовно, питання критичних мінералів є актуальним і для України (Рудько, Бала, 2021), але більш важливим, особливо в умовах відновлення її економічного потенціалу, є питання стратегічних корисних копалин. До них належать "... найважливіші корисні копалини загальнодержавного значення, що забезпечують економічну безпеку держави, стабільність розвитку національної економіки у довгостроковій перспективі, а також сприятливі та безпечні умови проживання населення", а саме: природний газ, нафта, вугілля, уран, золото, залізо, марганець, хром, титан, молибден, мідь, нікель, кобальт, свинець, цинк, благородні, рідкісні метали (берилій, літій, тантал, цирконій тощо), РЗЕ, сировина для металургії, гірничохімічна, агрохімічна та будівельна сировина, графіт, природно захищені питні та мінеральні води (Проект закону..., 2021).

У списку провідних видобувних країн світу за обсягом видобутку мінеральної сировини Україна посідає 26-те місце з видобутком у 2019 р. 92 млн т (для порівняння: Китай – 4 324, США – 2 335, Росія – 1 685, Австралія – 1 351, Індія – 1 060 млн т), а за вартістю видобутої сировини – 40-ве місце (\$ 11 654 млн) (для порівняння: Китай – \$ 583 714 млн, США – 555 067 млн, Росія – 421 049 млн, Саудівська Аравія – 276 745 млн, Австралія – 174 640 млн) (World Mining..., 2021).

У табл. 1 за закордонними даними наведено динаміку видобутку найважливіших корисних копалин в Україні. Як видно, за п'ять років (2015–2019) в Україні суттєво збільшився видобуток марганцю, титану, польового шпату, сірки, але знизився – галію, бентоніту, циркону, вугілля, урану. Особливе занепокоєння викликає різке зменшення видобутку у 2019 р. порівняно із 2018 р. таких видів корисних копалин, як галій, бентоніт, графіт, циркон, вугілля, уран. Ці дані треба враховувати під час оцінювання інвестиційної привабливості МСБ України.

Таблиця 1

Динаміка видобутку найважливіших корисних копалин України (World Mining..., 2021)

| Сировина                 | 2015       | 2016       | 2017       | 2018       | 2019       | 15/19  | 18/19  |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|--------|
| Залізо, т                | 42 817 200 | 40 240 600 | 38 767 600 | 38 751 300 | 40 451 100 | -5,53  | 4,39   |
| Марганець, т             | 546 600    | 491 500    | 650 500    | 682 700    | 686 100    | 25,52  | 0,50   |
| Титан, т                 | 375 480    | 339 800    | 430 300    | 518 950    | 564 050    | 50,22  | 8,69   |
| Галій, т                 | 9          | 9          | 9          | 6          | 5          | -44,44 | -16,67 |
| Германій, т              | 1          | 1          | 1          | 1          | 1          | 0      | 0      |
| Бентоніт, т              | 220 000    | 200 000    | 113 200    | 178 200    | 124 700    | -43,32 | -30,02 |
| Польовий шпат, т         | 44 460     | 33 627     | 35 000     | 50 000     | 60 000     | 34,95  | 20,00  |
| Графіт, т                | 10 000     | 12 000     | 13 000     | 15 000     | 10 000     | 0      | -33,33 |
| Гіпс, т                  | 1 254 900  | 1 303 000  | 1 528 900  | 1 386 400  | 1 409 400  | 12,31  | 1,66   |
| Каолін, т                | 1 814 786  | 2 335 004  | 2 379 636  | 2 091 525  | 1 843 561  | 1,59   | -11,86 |
| Сіль, т                  | 2 136 500  | 1 783 530  | 1 815 684  | 2 191 619  | 2 092 795  | -2,05  | -4,51  |
| Сірка, т                 | 171 700    | 171 300    | 175 900    | 222 200    | 220 400    | 28,36  | -0,81  |
| Циркон, т                | 30 000     | 29 280     | 27 239     | 21 614     | 18 000     | -40,00 | -16,72 |
| Вугілля, т               | 23 852 700 | 25 121 500 | 18 932 900 | 21 648 100 | 19 747 200 | -17,21 | -8,78  |
| Коксівне вугілля, т      | 6 063 900  | 6 508 800  | 5 233 900  | 4 606 300  | 5 783 200  | -4,63  | 25,55  |
| Газ, млрд м <sup>3</sup> | 19 900     | 20 052     | 20 510     | 20 806     | 20 520     | 3,12   | -1,37  |
| Нафта, т                 | 2 533 300  | 2 272 100  | 2 169 900  | 2 293 300  | 2 453 600  | -3,15  | 6,99   |
| Уран, т                  | 1 156      | 1 185      | 986        | 1 390      | 944        | -18,34 | -32,09 |
| Усього, т                | 97 792 692 | 96 884 836 | 88 682 655 | 91 303 405 | 91 881 056 |        |        |

Основу МСБ України становлять рудні родовища. Розробляються родовища залізних, марганцевих, уранових, титанових, цирконієвих руд. Відомі родовища золота, берилію, літію, ванадію, скандію, свинцю, цинку, ніобію, танталу, стронцію, гафнію, кадмію, срібла, РЗЕ, які наближаються до промислових параметрів, що дозволяє залучити їх до розроблення в майбутньому. Прогнозується

можливість виявлення родовищ міді, хрому, вольфраму, олова, молибдену, сурми, алюмінію, нікелю, МПГ, рідкісних металів тощо (Гайлін та ін., 2017; Генетические типы..., 1995; Загнітко та ін., 2017; Зарицький та ін., 1994; Інвестиційний атлас..., 2021; Кулиш, Плотников, 2005; Мінеральні ресурси..., 2021; Шнюков і др., 1993; Mykhailov et al., 2021).

Найважливішими гірничорудними регіонами України, де здійснюється розроблення родовищ і функціонують підприємства з видобутку металічної сировини, є (рис. 1):

- залізорудні – Криворізький, Кременчуцький, Білозерський, Керченський рудні райони;
- марганцеві руди – Нікопольський і Токмацький рудні райони;

- титаново-цирконієві – Самотканський рудний район;
- титаново-апатитові – Іршанський рудний район;
- уранові руди – Кіровоградський та Центрально-український рудні райони;
- ртуть – Микитівський рудний район;
- нікель – Побузький рудний район;
- золото-поліметалічні – Мужівський рудний район.

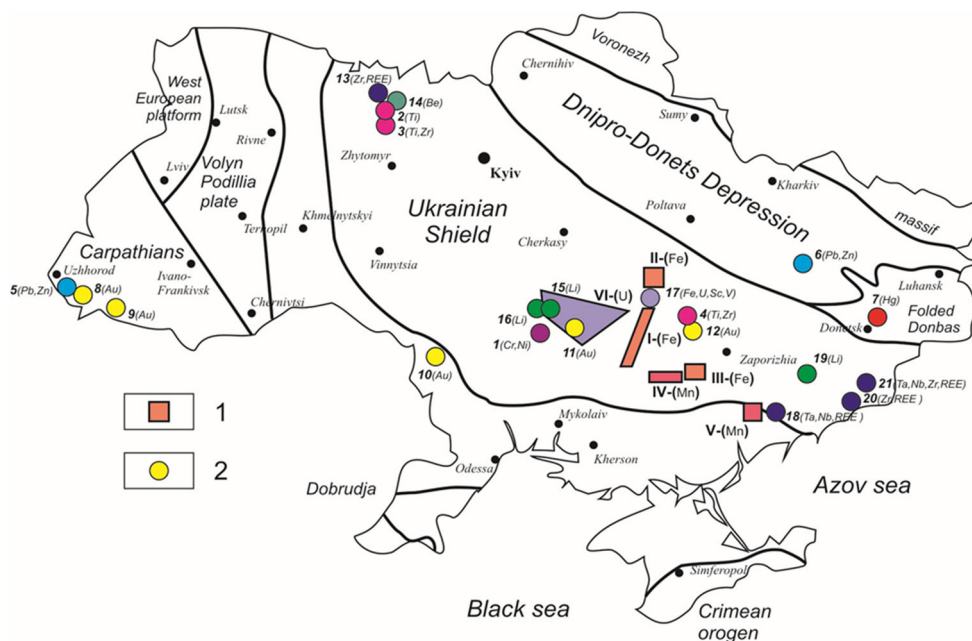


Рис. 1. Найважливіші гірничорудні райони та рудні родовища України (Mykhailov, Hrinchenko, 2018):

- 1 – гірничорудні райони: I – Криворізький (Fe), II – Кременчуцький (Fe), III – Білозерський (Fe), IV – Нікопольський (Mn), V – Токмацький (Mn), VI – Кіровоградський (U); 2 – рудні родовища: 1 – Капітанівське (Cr, Ni), 2 – Стремигородське (Ti), 3 – Іршанське (Ti, Zr), 4 – Малишевське (Ti, Zr), 5 – Берегове (Pb, Zn), 6 – Біляївське (Pb, Zn), 7 – Микитівське (Hg), 8 – Мужівське (Au), 9 – Сауляк (Au), 10 – Майське (Au), 11 – Клинцівське (Au), 12 – Сергіївське (Au), 13 – Яструбецьке (Zr, TR), 14 – Пержанське (Be), 15 – Полохівське (Li), 16 – Станкуватське (Li), 17 – Жовторіченське (Fe, U, Sc, V), 18 – Новополтавське (Ta, Nb, TR), 19 – Шевченківське (Li), 20 – Азовське (Zr, P3E), 21 – Мазурівське (Ta, Nb, Zr, TR)

Україна має надійну базу неметалічних корисних копалин, яка налічує близько 4000 родовищ, з яких майже 2000 розробляються чи розроблялися раніше. В Україні зосереджені значні запаси та ведеться видобуток (Гурський та ін., 2006<sup>2</sup>; Михайлов та ін., 2008):

- калійна сіль – у Прикарпатті (Калуш-Голинське та Стебницьке родовища);
- кам'яна сіль – у ДДЗ, Донбасі, Карпатах (Новокарафагенське, Роменське, Єфремівське, Артемівське, Солотвинське);
- сірка – у Передкарпатті (Немирівське, Подорожницьке, Язівське);
- крейда – на Донбасі (Райгородське, Слов'янське, Білогірське, Бантишевське);
- графіт – на УШ (Завалівське, Балахівське, Петрівське, Троїцьке);
- каолін – на УШ, в Закарпатті, ДДЗ (Глуховецьке, Біляївське, Полозьке);
- бентоніт – на УШ, в ДДЗ, Прикарпатті, ВПП, Криму (Черкаське, Горбківське, Пиживське, Кудринське, Курцівське);
- вогнестійкі глини – в ДДЗ, на Донбасі та УШ (Часов'ярське, Новорайське);
- доломіти – на Донбасі, в Карпатах (Ямське, Новотроїцьке, Оленівське, Стильське);
- вапняки – на УШ, Донбасі, у Криму (Оленівське, Каракубське, Псеалераське);
- кварцит – на УШ (Овруцьке), кварцовий пісок на Донбасі;

- формувальні піски – на Донбасі, у ДДЗ, на УШ, ВПП (Гусарівське, Часов'ярське, Орехівське, Полозьке, Малишевське);

- цементна сировина (вапняк, мергель, крейда, глина, туфи, гіпс та ангідрит);
- облицювальне та будівельне каміння (граніт, габро, лабрадорит, туф, травертин, мармур, пісковик);
- пісок кварцовий (Папірнянське, Новоселівське, Великоглебівське), а також апатит, мінеральні фарби, фосфорити, кам'яна сировина, озокерит, польовий шпат, цеоліт, флюорит, барит, бром і йод, вермикуліт, перліт, тальк, пірофіліт, гіпс та ангідрит, вогнетривкий керамзит, глина, сировина для мінеральної вати та багато іншого.

Нами було проаналізовано і систематизовано стратегічні корисні копалини України за їхньою інвестиційною привабливістю і виділено такі групи (табл. 2):

**1) традиційні**, які інтенсивно розробляються в Україні, мають значні розвідані запаси, забезпечують наповнення державного бюджету; характеризуються високим рівнем інвестиційної привабливості ( $\geq 70\%$ ), низьким ризиком інвестиційних вкладень ( $\leq 30\%$ ), але високою конкуренцією;

**2) високоперспективні**, родовища яких в Україні відомі, зі значними запасами (ресурсами), але поки що не розробляються або розробляються в незначних обсягах; мають високий рівень інвестиційної привабливості ( $\geq 70\%$ ), низькі ризики інвестиційних вкладень ( $\leq 30\%$ ); характеризуються середнім рівнем конкуренції;

**3) перспективні**, родовища яких в Україні відомі, але запаси (ресурси) достовірно не встановлені, тому перспективи їх освоєння остаточно не визначені; характеризуються середнім рівнем інвестиційної привабливості (50–69 %), середніми ризиками інвестиційних вкладень (31–50 %), низькою конкуренцією;

**4) з невиясненими перспективами**, прояви та дрібні родовища яких відомі в Україні, проте їхні масштаби не дозволяють припускати значних ресурсів; характеризуються низьким рівнем інвестиційної привабливості (< 50 %), високими ризиками інвестиційних вкладень (> 50 %), відсутністю конкуренції.

Таблиця 2

## Стратегічні корисні копалини України

| Металічні корисні копалини                                                                                   | Неметалічні корисні копалини                                                                                                                                                                                                          | Горючі корисні копалини                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Традиційні</b>                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                             |
| Залізо<br>Марганець<br>Титан<br>Уран                                                                         | Каолін<br>Піски формувальні<br>Будівельне і облицювальне каміння<br>Глина тугоплавка                                                                                                                                                  | Газ<br>Нафта<br>Конденсат<br>Вугілля                                                        |
| <b>Високоперспективні</b>                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                             |
| Рідкісні землі<br>Цирконій і гафній<br>Літій<br>Скандій<br>Германій                                          | Графіт<br>Солі калійні<br>Абразивна сировина (гранат)<br>Кварцова сировина<br>Сировина п'єзооптична (п'єзокварц)                                                                                                                      | Метан вугільних родовищ                                                                     |
| <b>Перспективні</b>                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                             |
| Нікель<br>Кобальт<br>Хром<br>Алюміній<br>Мідь<br>Тантал<br>Ніобій<br>Берилій<br>Золото                       | Фосфорити<br>Фосфатна руда (апатит)<br>Плавиківий шпат (флюорит)<br>Глауконіт<br>Флюсові вапняки і доломіти<br>Вапняки для цукрової промисловості<br>Бентонітові глини<br>Польовошпатова сировина<br>Каменебарвна сировина            | Горючі сланці<br>Торф<br>Сланцевий газ<br>Сланцева нафта<br>Газ ущільнених порід-колекторів |
| <b>З невиясненими перспективами</b>                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                             |
| Ванадій<br>Свинець<br>Цинк<br>Вольфрам<br>Молибден<br>МПП<br>Стронцій<br>Магній<br>Миш'як<br>Рубідій і цезій | Барит<br>Бор<br>Давсоніт<br>Бром і йод<br>Мінеральні сорбенти (цеоліт, вермикуліт, палигорськіт)<br>Високоглиноземиста сировина (силіманіт, дистен, андалузит)<br>Алмаз<br>Сировина для виробництва мінеральних фарб<br>Фтор<br>Сірка | Газогідрати                                                                                 |

Що стосується таких критичних корисних копалин, які мають стратегічне значення для світової промисловості, як сурма, вісмут, індій, олово, торій, реній, телур, кремній металічний, гелій тощо, то перспектив знаходження в Україні їхніх промислових скупчень немає, тому вони надалі не розглядаються.

Вибір першочергових об'єктів для отримання капітальних інвестицій у сфері використання надр доцільно проводити за результатами відповідного оцінювання інвестиційної привабливості конкретних об'єктів МСБ, яке передбачає встановлення абсолютних і відносних критеріїв та ранжування об'єктів.

Методика оцінювання залежить від мети, яка може полягати в такому: 1) оцінювання доцільності капітальних інвестицій у розширення і технічне переоснащення діючих добувних підприємств; 2) вибір альтернативних об'єктів використання надр для інвестицій, у тому числі родовищ, які ще не розроблялися; 3) закупівля цінних паперів окремих добувних компаній.

Визначено перелік критеріїв попереднього оцінювання перспектив інвестицій у вітчизняний мінерально-сировинний комплекс. Цей перелік базується на якісних і кількісних параметрах родовищ корисних копалин, геологічних, гірничо-технічних, технологічних передумовах

освоєння, а також включає базові техніко-економічні показники. Розроблена система критеріїв оцінювання інвестиційної привабливості об'єктів МСБ металічних і неметалічних корисних копалин України, яка включає такі показники:

- 1) критичність сировини, потреба в ній на світовому ринку;
- 2) ступень геологічного і геолого-економічного вивчення родовища;
- 3) геолого-промисловий тип, складність геологічної будови;
- 4) розміри родовища, запаси і ресурси;
- 5) якість сировини (вміст корисних компонентів);
- 6) комплексність родовища, наявність супутніх корисних компонентів;
- 7) гірничотехнічні умови експлуатації;
- 8) технологічні особливості збагачення;
- 9) екологічні умови експлуатації родовища;
- 10) наявна інфраструктура.

За розробленими критеріями проведені експертне оцінювання і ранжування низки об'єктів вітчизняної МСБ за рівнем інвестиційної привабливості та ризиком інвестицій у промислове освоєння для головних груп металічних і неметалічних корисних копалин (табл. 3, 4).

Таблиця 3

Експертна оцінка інвестиційної привабливості металічних корисних копалин України

| Метал  | Родовища (прояви)                                                 | Критерії |    |   |    |   |    |   |   |   |    |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------|----------|----|---|----|---|----|---|---|---|----|----|
|        |                                                                   | 1        | 2  | 3 | 4  | 5 | 6  | 7 | 8 | 9 | 10 | Σ  |
| Ti, Zr | Стремигородське (Ti+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +Sc+V+F+каолін) | 6        | 4  | 5 | 7  | 4 | 10 | 3 | 6 | 4 | 7  | 56 |
|        | Федорівське (Ti+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )                   | 6        | 3  | 4 | 5  | 6 | 7  | 4 | 6 | 4 | 6  | 51 |
|        | Носачівське (Ti+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +плагіосировина)    | 6        | 3  | 4 | 6  | 5 | 8  | 3 | 6 | 4 | 7  | 52 |
|        | Тарасівське (Ti+Zr+Sc+dis+sil+st)                                 | 6        | 7  | 8 | 5  | 6 | 9  | 9 | 8 | 9 | 8  | 75 |
|        | Юріївсько-Козіївська (Ti+Zr)                                      | 6        | 2  | 8 | 4  | 5 | 6  | 9 | 7 | 8 | 9  | 64 |
|        | Біловодська (Ti+Zr)                                               | 6        | 2  | 4 | 3  | 4 | 6  | 8 | 5 | 7 | 8  | 53 |
|        | Корчаківська (Ti+Zr)                                              | 6        | 2  | 4 | 3  | 4 | 6  | 8 | 5 | 7 | 8  | 53 |
|        | Храпівщина (Ti+Zr)                                                | 6        | 2  | 4 | 3  | 4 | 6  | 8 | 5 | 7 | 8  | 53 |
|        | Гайдарівська (Ti+Zr)                                              | 6        | 2  | 4 | 3  | 4 | 6  | 8 | 5 | 7 | 8  | 53 |
|        | Малишевське (ПЗ ділянка) (Ti+Zr+ dis+sil+st)                      | 6        | 7  | 8 | 7  | 8 | 10 | 9 | 8 | 9 | 9  | 81 |
|        | Вовчанське (Ti+Zr)                                                | 6        | 3  | 7 | 4  | 5 | 6  | 9 | 6 | 7 | 8  | 61 |
|        | Краснокутське (Ti+Zr)                                             | 6        | 2  | 6 | 3  | 5 | 7  | 8 | 6 | 7 | 7  | 57 |
|        | Зеленоярське (Ti+Zr)                                              | 6        | 3  | 5 | 2  | 6 | 8  | 7 | 5 | 6 | 6  | 54 |
|        | Мокроялинське (Ti+Zr)                                             | 6        | 2  | 4 | 2  | 2 | 4  | 5 | 6 | 7 | 6  | 44 |
|        | Яструбецьке (Zr+TR)                                               | 6        | 4  | 3 | 7  | 6 | 5  | 2 | 3 | 5 | 6  | 47 |
| TR     | Новополтавське (TR+Nb+Ta+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )          | 10       | 9  | 6 | 8  | 7 | 10 | 6 | 7 | 8 | 9  | 80 |
|        | Анадольське (TR)                                                  | 10       | 6  | 7 | 7  | 6 | 5  | 2 | 7 | 6 | 8  | 64 |
|        | Азовське (TR+Zr)                                                  | 10       | 7  | 6 | 8  | 7 | 9  | 6 | 3 | 7 | 8  | 71 |
|        | Балка Корабельна (TR)                                             | 10       | 3  | 4 | 2  | 4 | 5  | 6 | 4 | 6 | 8  | 52 |
|        | Петрово-Гнупівський прояв (TR)                                    | 10       | 7  | 8 | 2  | 9 | 4  | 7 | 8 | 7 | 8  | 70 |
|        | Мазурівське (TR+Zr+Ta+Nb)                                         | 10       | 8  | 7 | 9  | 6 | 10 | 7 | 8 | 6 | 8  | 79 |
|        | Успенівський (TR)                                                 | 10       | 2  | 4 | 3  | 3 | 2  | 5 | 2 | 6 | 7  | 44 |
|        | Хашуватське (Fe+Mn+TR)                                            | 10       | 5  | 7 | 2  | 3 | 7  | 8 | 4 | 6 | 8  | 60 |
| Li     | Шевченківське (Li+Ta+Nb+Be+Q+слюда)                               | 10       | 7  | 6 | 8  | 9 | 7  | 4 | 5 | 6 | 8  | 70 |
|        | Полохівське (Li)                                                  | 10       | 8  | 5 | 9  | 5 | 2  | 5 | 6 | 7 | 8  | 65 |
|        | Станкуватське (Li+Rb+Cz+Ta+Nb+Be+Sn)                              | 10       | 8  | 6 | 9  | 8 | 9  | 4 | 6 | 6 | 8  | 74 |
|        | Крута Балка (Li+Ta+Nb+Cz+Rb)                                      | 10       | 5  | 6 | 3  | 4 | 9  | 4 | 5 | 6 | 7  | 59 |
| Sc     | Жовторіченське (Fe+U+V+Sc)                                        | 10       | 9  | 5 | 8  | 6 | 10 | 7 | 6 | 4 | 9  | 74 |
| Ge     | Вугілля Донбасу                                                   | 8        | 10 | 9 | 10 | 8 | 9  | 8 | 9 | 5 | 10 | 86 |
|        | Малобіганське                                                     | 8        | 6  | 7 | 2  | 5 | 8  | 7 | 8 | 5 | 7  | 63 |
| Ni, Co | Тарнуватське (Ni+Co)                                              | 7        | 5  | 4 | 6  | 5 | 4  | 6 | 4 | 5 | 8  | 54 |
|        | Девладівське (Ni+Co+Fe+вогнетривкі глини)                         | 7        | 4  | 5 | 5  | 6 | 7  | 5 | 5 | 4 | 6  | 54 |
|        | Західно-Лашівська (Co+Ni)                                         | 7        | 3  | 4 | 4  | 5 | 4  | 5 | 3 | 6 | 7  | 48 |
|        | Сухохоторська (тальк-магнезит+Ni+Co)                              | 6        | 3  | 5 | 6  | 5 | 8  | 4 | 6 | 7 | 4  | 54 |
| Cr     | Капітанівське (Cr+Ni)                                             | 6        | 7  | 5 | 7  | 8 | 6  | 4 | 5 | 6 | 7  | 61 |
|        | Липовенківське (Cr+Ni+Co)                                         | 7        | 7  | 5 | 7  | 8 | 7  | 5 | 8 | 5 | 6  | 71 |
| Al     | Високопільське (боксити)                                          | 5        | 7  | 4 | 2  | 4 | 3  | 8 | 7 | 4 | 7  | 51 |
|        | Південнонікопольське (боксити)                                    | 5        | 4  | 4 | 2  | 3 | 3  | 7 | 7 | 5 | 6  | 46 |
|        | Біганське (алуніти+барит+Pb+Zn)                                   | 5        | 3  | 4 | 2  | 3 | 5  | 6 | 4 | 4 | 5  | 41 |
| Cu     | Жиричі (Cu)                                                       | 6        | 6  | 5 | 2  | 4 | 3  | 4 | 6 | 5 | 5  | 46 |
|        | Рафалівське (Cu)                                                  | 6        | 6  | 4 | 1  | 2 | 3  | 3 | 2 | 4 | 6  | 37 |
|        | Прутівський (Cu+Ni+Co)                                            | 6        | 2  | 4 | 2  | 5 | 6  | 3 | 4 | 5 | 4  | 41 |
|        | Железняки (Cu+Ni+Co)                                              | 6        | 2  | 4 | 2  | 5 | 7  | 4 | 3 | 5 | 6  | 44 |
| Be     | Пержанське (Be)                                                   | 8        | 6  | 5 | 7  | 6 | 3  | 5 | 6 | 6 | 7  | 59 |
| Au     | Сергіївське (Au, Mo)                                              | 9        | 5  | 4 | 5  | 6 | 6  | 4 | 5 | 4 | 6  | 54 |
|        | Балка Золота                                                      | 9        | 4  | 5 | 3  | 5 | 2  | 5 | 4 | 5 | 6  | 48 |
|        | Балка Широка                                                      | 9        | 7  | 4 | 5  | 6 | 5  | 4 | 5 | 6 | 5  | 56 |
|        | Сурозьке                                                          | 9        | 3  | 5 | 4  | 5 | 3  | 5 | 6 | 5 | 4  | 49 |
|        | Клинцівське                                                       | 9        | 5  | 4 | 6  | 6 | 3  | 4 | 5 | 4 | 6  | 52 |
|        | Юріївське                                                         | 9        | 6  | 5 | 4  | 6 | 3  | 3 | 6 | 5 | 5  | 52 |
|        | Майське                                                           | 9        | 7  | 5 | 6  | 6 | 2  | 4 | 6 | 5 | 4  | 54 |
|        | Квітківська                                                       | 9        | 4  | 4 | 3  | 3 | 2  | 4 | 4 | 5 | 4  | 42 |
|        | Мужіївське                                                        | 9        | 8  | 2 | 3  | 4 | 6  | 4 | 2 | 4 | 8  | 50 |
|        | Берегівське                                                       | 9        | 4  | 2 | 2  | 4 | 5  | 3 | 4 | 4 | 5  | 42 |
|        | Сауляк                                                            | 9        | 4  | 7 | 6  | 7 | 4  | 5 | 7 | 3 | 4  | 56 |
|        | Бобринівське                                                      | 9        | 2  | 4 | 4  | 5 | 7  | 6 | 5 | 5 | 6  | 53 |
|        | Михайлівський                                                     | 9        | 2  | 3 | 2  | 3 | 2  | 4 | 3 | 4 | 5  | 37 |

dis – дістен; sil – силіманіт; st – стаєроліт; жирним позначені родовища (прояви), на які відкриті ліцензійні пропозиції

Таблиця 4

## Експертна оцінка інвестиційної привабливості неметалічних корисних копалин України

| Види сировини        | Родовища (прояви)                        | Критерії |    |   |    |    |   |   |   |   |    |    |
|----------------------|------------------------------------------|----------|----|---|----|----|---|---|---|---|----|----|
|                      |                                          | 1        | 2  | 3 | 4  | 5  | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Σ  |
| Каолін               | Глуховецьке*                             | 5        | 9  | 8 | 9  | 9  | 2 | 8 | 9 | 5 | 10 | 74 |
|                      | Турбівське*                              | 5        | 8  | 9 | 7  | 8  | 2 | 9 | 8 | 6 | 9  | 73 |
|                      | Великогадоминецьке*                      | 5        | 9  | 8 | 8  | 9  | 2 | 9 | 8 | 5 | 9  | 72 |
|                      | Жежелівське*                             | 5        | 10 | 9 | 8  | 9  | 2 | 8 | 9 | 6 | 9  | 75 |
|                      | Новоселицьке*                            | 5        | 3  | 6 | 3  | 4  | 2 | 6 | 7 | 4 | 4  | 44 |
|                      | Кіровоградське                           | 5        | 4  | 5 | 2  | 5  | 2 | 5 | 6 | 5 | 4  | 43 |
|                      | Пологівське*                             | 5        | 3  | 4 | 3  | 4  | 2 | 4 | 4 | 5 | 3  | 37 |
|                      | Володимирівське                          | 5        | 2  | 3 | 2  | 4  | 2 | 4 | 4 | 5 | 3  | 34 |
|                      | Мурзинське*                              | 5        | 4  | 5 | 7  | 8  | 2 | 7 | 8 | 5 | 4  | 55 |
| Облицювальне каміння | Сліпичське (лабрадорит)*                 | 4        | 9  | 8 | 10 | 10 | 2 | 9 | 8 | 6 | 10 | 76 |
|                      | Головинське (лабрадорит)*                | 4        | 9  | 8 | 10 | 10 | 2 | 9 | 8 | 6 | 10 | 76 |
|                      | Омелянівське (граніт)*                   | 4        | 9  | 8 | 9  | 9  | 2 | 9 | 8 | 7 | 9  | 74 |
|                      | Лизницьке (граніт)*                      | 4        | 9  | 8 | 10 | 7  | 2 | 8 | 9 | 6 | 8  | 71 |
|                      | Корнинське (граніт)*                     | 4        | 9  | 8 | 9  | 6  | 2 | 8 | 8 | 7 | 10 | 71 |
|                      | Токівське (граніт)*                      | 4        | 9  | 8 | 10 | 7  | 2 | 8 | 9 | 7 | 9  | 73 |
|                      | Капустянське (граніт)                    | 4        | 9  | 8 | 9  | 8  | 2 | 8 | 9 | 7 | 9  | 73 |
|                      | Великокамінецьке (мармуризовані вапняки) | 4        | 7  | 6 | 7  | 7  | 2 | 8 | 8 | 6 | 7  | 62 |
|                      | Великокужелівське (травертин)            | 4        | 4  | 5 | 3  | 4  | 2 | 6 | 4 | 5 | 3  | 40 |
| Глина тугоплавка     | Беретянське (туфи)                       | 4        | 3  | 4 | 3  | 5  | 2 | 5 | 3 | 4 | 4  | 37 |
|                      | Часов'ярське (+піски формувальні)*       | 5        | 9  | 8 | 10 | 9  | 8 | 9 | 8 | 7 | 9  | 82 |
|                      | Новорайське*                             | 5        | 9  | 8 | 9  | 9  | 5 | 9 | 8 | 7 | 9  | 78 |
|                      | Веселівське                              | 5        | 6  | 7 | 6  | 7  | 4 | 8 | 6 | 6 | 5  | 60 |
|                      | Пологівське*                             | 5        | 8  | 8 | 6  | 9  | 5 | 8 | 7 | 6 | 8  | 70 |
| Графіт               | Володимирівське*                         | 5        | 9  | 7 | 6  | 9  | 5 | 9 | 8 | 5 | 8  | 71 |
|                      | Завалівське (+гранат)*                   | 8        | 9  | 8 | 10 | 10 | 9 | 7 | 9 | 7 | 10 | 87 |
|                      | Петрівське                               | 8        | 6  | 7 | 6  | 7  | 5 | 6 | 7 | 6 | 5  | 63 |
|                      | Балахівське                              | 8        | 7  | 7 | 8  | 8  | 5 | 6 | 7 | 6 | 6  | 68 |
|                      | Буртинське (Хмельівська ділянка)         | 8        | 6  | 8 | 9  | 8  | 5 | 6 | 8 | 7 | 6  | 71 |
|                      | Троїцьке                                 | 8        | 5  | 6 | 6  | 6  | 5 | 6 | 7 | 6 | 5  | 60 |
|                      | Маріупольське                            | 8        | 4  | 5 | 5  | 4  | 4 | 5 | 6 | 6 | 4  | 51 |
| Калійні солі         | Стебницьке*                              | 4        | 8  | 7 | 8  | 9  | 6 | 7 | 8 | 4 | 8  | 69 |
|                      | Калуш-Голинське*                         | 4        | 8  | 7 | 8  | 9  | 6 | 7 | 8 | 4 | 8  | 69 |
| Гранат               | Слобідське*                              | 5        | 8  | 8 | 9  | 8  | 7 | 8 | 8 | 6 | 9  | 76 |
|                      | Іванівське *                             | 5        | 8  | 8 | 9  | 8  | 7 | 8 | 8 | 6 | 9  | 76 |
|                      | Лозненське                               | 5        | 7  | 7 | 8  | 7  | 6 | 8 | 7 | 5 | 7  | 67 |
| Кварцова сировина    | Гусарівське (+піски формувальні)*        | 4        | 9  | 8 | 9  | 8  | 9 | 9 | 8 | 5 | 9  | 78 |
|                      | Авдіївське                               | 4        | 6  | 8 | 7  | 7  | 5 | 7 | 7 | 5 | 6  | 62 |
|                      | Великоглібовецьке*                       | 4        | 7  | 8 | 8  | 8  | 5 | 8 | 8 | 5 | 9  | 70 |
|                      | Ардівське (перліт)                       | 4        | 6  | 7 | 9  | 7  | 8 | 8 | 9 | 4 | 5  | 67 |
| П'єзокварц           | Волинське (+ каменебарвна сир.)          | 8        | 9  | 8 | 9  | 9  | 8 | 6 | 8 | 7 | 9  | 81 |
| Фосфорити            | Ратнівське (Поступельська ділянка)       | 4        | 7  | 7 | 8  | 8  | 5 | 8 | 7 | 6 | 6  | 66 |
|                      | Осиківське                               | 4        | 6  | 7 | 7  | 7  | 4 | 8 | 7 | 6 | 5  | 61 |
|                      | Жванське                                 | 4        | 8  | 7 | 9  | 8  | 5 | 8 | 8 | 6 | 7  | 70 |
| Флюорит              | Бахтинське                               | 6        | 7  | 6 | 7  | 6  | 8 | 7 | 8 | 6 | 7  | 68 |
|                      | Покрово-Кириївське                       | 6        | 7  | 6 | 7  | 7  | 5 | 7 | 7 | 6 | 5  | 63 |
|                      | Вищеолчедаєвський прояв                  | 6        | 5  | 6 | 4  | 5  | 4 | 6 | 6 | 5 | 5  | 52 |
|                      | Центральний прояв                        | 6        | 4  | 6 | 7  | 8  | 9 | 7 | 7 | 6 | 6  | 66 |
|                      | Яструбецький прояв                       | 6        | 4  | 5 | 6  | 6  | 9 | 7 | 8 | 5 | 5  | 61 |
|                      | Бобринецький прояв                       | 6        | 5  | 6 | 7  | 5  | 7 | 6 | 7 | 6 | 4  | 59 |
|                      | Петрово-Гнугівський                      | 6        | 4  | 6 | 4  | 7  | 8 | 5 | 6 | 5 | 4  | 55 |
| Вапняки цукр. пром.  | Замок*                                   | 5        | 9  | 8 | 9  | 8  | 6 | 9 | 8 | 6 | 10 | 78 |
|                      | Лисогірка*                               | 5        | 9  | 8 | 9  | 8  | 6 | 9 | 8 | 6 | 10 | 78 |
| Бентоніт             | Черкаське*                               | 7        | 9  | 8 | 10 | 9  | 5 | 8 | 8 | 6 | 10 | 80 |
|                      | Кіштинське                               | 7        | 5  | 6 | 7  | 6  | 5 | 6 | 6 | 5 | 4  | 57 |

\* – Родовище у розробці

На основі експертного оцінювання інвестиційної привабливості родовищ металічних та неметалічних корисних копалин України як найперспективніші виділені такі об'єкти, які можуть розглядатися як першочергові для інвестування (оцінка в балах):

• **титан-цирконій**: Тарасівське родовище (75) і північно-західна ділянка Малишевського родовища (81);

• **рідкісні землі**: Новополтавське (80), Мазурівське (79), Азовське (71) родовища і Петрово-Гнугівський прояв (70);

• **літій**: Станкуватське (74) і Шевченківське (70) родовища;

• **скандій**: Жовторіченське родовище (74);

• **германій**: вугілля Донбасу (86);

• **хром, нікель, кобальт**: Липовенківське родовище (71);

- **каолін:** Жежелівське (75), Глуховецьке (74), Турбівське (73), Великогадоминецьке (72) родовища;
- **облицювальне каміння:** Сліпчицьке (76) і Голови́нське (76) родовища лабрадору; Омелянівське (74), Токівське (73), Капустянське (73), Лизницьке (71) і Корнинське (71) родовища граніту;
- **тугоплавкі глини:** Часов'ярське (82), Новорайське (78), Володимирівське (71), Пологівське (70);
- **графіт:** Завалівське (87), Буртинське (Хмельівська ділянка) (71) родовища;
- **гранат:** Слобідське (76), Іванівське (76) родовища;
- **кварцова сировина:** Гусарівське (78), Великоглибовецьке (70) родовища;
- **п'єзокварц:** Волинське родовище (із проявами каменебарвної сировини) (81);
- **фосфорити:** Жванське родовище (70);
- **вапняки для цукрової промисловості:** родовища Замок (78), Лисогірка (78);
- **бентоніт:** Черкаське родовище (80).

**Висновки.** Перспективи подальшого розвитку мінерально-сировинного комплексу України пов'язані насамперед із залізними, марганцевими, урановими, титановими та цирконієвими рудами, які традиційно видобуваються з надр України, із залученням до промислового розроблення комплексних рідкісних і рідкісноземельних руд (Пержанське, Мазурівське, Новополтавське, Азовське родовища), розвідкою та оцінюванням родовищ кольорових і дорогоцінних металів, неметалічних корисних копалин. Загальними завданнями найближчих років є пошук родовищ нових геолого-промислових типів, розв'язання технологічних завдань комплексного вилучення корисних компонентів, геолого-економічне оцінювання об'єктів з урахуванням вимог ринкової економіки. Важливими є також проблеми забезпечення раціонального природокористування та мінімізації негативних екологічних наслідків розроблення родовищ.

Виділено чотири категорії стратегічних корисних копалин за їхньою інвестиційною привабливістю: традиційні (залізо, марганець, титан, уран, каолін, піски формувальні, будівельне й облицювальне каміння, глина тугоплавка); високоперспективні (рідкісні землі, цирконій і гафній, літій, скандій, германій, графіт, солі калійні, абразивна сировина (гранат), кварцова сировина, сировина п'єзооптична); перспективні (нікель, кобальт, хром, алюміній, мідь, тантал і ніобій, берилій, золото, фосфорити, апатит, плавиковий шпат, глауконіт, флюсові вапняки і доломіти, вапняки для цукрової промисловості, бентонітові глини, польовошпатована сировина, каменебарвна сировина); з невиясненими перспективами (ванадій, свинець і цинк, вольфрам, молібден, платина і платиноїди, стронцій, магній, миш'як, рубідій, цезій, барит, бор, давсоніт, бром і йод, мінеральні сорбенти, високоглиноземиста сировина, алмаз, сировина для виробництва мінеральних фарб, фтор, сірка).

Як першочергові об'єкти інвестування в мінерально-сировинну базу України можна рекомендувати такі види сировини: з металічних корисних копалин – родовища титану і цирконію, рідкісноземельних елементів, літію, скандію, германію, а з неметалічних – каоліну, графіту, облицювального каміння, гранату, п'єзокварцу тощо.

Надалі для визначення перспектив інвестування по конкретних об'єктах МСБ необхідним є:

- аналіз динаміки світового ринку щодо того чи іншого виду сировини за останні роки для розуміння тенденцій її подальшого розвитку;
- визначення об'єктів можливого ліцензування;

• аналіз первинних матеріалів ГРР із метою визначення об'єктивності оцінювання промислового потенціалу об'єкта;

• попереднє геолого-економічне оцінювання доцільності та рентабельності освоєння об'єктів (капітальні вкладення, експлуатаційні витрати, дохід від реалізації продукції тощо).

#### Список використаних джерел

- Гайлін, А.М., Рудько, Г.І., Чікова, І.В. (2017). Гірничо-хімічний потенціал України. Київ-Чернівці: Букрек, 192 с.
- Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины. (1995). К.: Наук. думка, 396 с.
- Гурський, Д.С., Єсипчук, К.Ю., Калінін, В.І. та ін. (2006<sup>1</sup>). Металічні і неметалічні корисні копалини України. Том І. Металічні корисні копалини. Київ-Львів: "Центр Європи", 785 с.
- Гурський, Д.С., Єсипчук, К.Ю., Калінін, В.І. та ін. (2006<sup>2</sup>). Металічні і неметалічні корисні копалини України. Том ІІ. Неметалічні корисні копалини. Київ-Львів: "Центр Європи", 552 с.
- Гурський, Д.С. (2008). Концептуальні засади державної мінерально-сировинної політики щодо використання стратегічно важливих для економіки країни корисних копалин. Львів: ЗУКЦ, 192 с.
- Довгий, С.О., Шестопапов, В.М., Коржнев, М.М. та ін. (2007). Реструктуризація мінерально-сировинної бази України та її інформаційне забезпечення. К.: Наук. думка, 400 с.
- Загнітко, В., Михайлов, В., Кривдік, С., Сидорчук, В. (2017). Генетичні особливості та ресурси рідкісноземельних родовищ Українського щита. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (76), 58–65.
- Зарицький, О.І., Лебідь, М.І., Куліш, Є.О. та ін. (1994). Рудні ресурси чорної металургії. *Мін. ресурси України*, 1, 10–13.
- Інвестиційний атлас надрокористувача. Стратегічні та критичні мінерали. (2021). Державна служба геології та надр України.
- Куліш, Е.А., Плотников, А.В. (2005). Геологические факторы экономической ценности железорудных месторождений. К.: Логос, 292 с.
- Михайлов, В.А., Шевченко, В.І., Огар, В.В. та ін. (2007). Металічні корисні копалини України. Підручник. К.: Київський університет, 463 с.
- Михайлов, В.А., Виноградов, Г.Ф., Курило, М.В. та ін. (2008). Неметалічні корисні копалини України. Підручник. К.: Київський університет, 494 с.
- Михайлов, В.А., Курило, М.М. (2010). Мінерально-сировинна база флюсової сировини України. К.: Ніка-центр, 200 с.
- Михайлов, В.А., Вакарчук, С.Г., Зейкан, О.Ю. та ін. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Кн. VIII. Теоретичне обґрунтування ресурсів нетрадиційних вуглеводнів осадових басейнів України. К.: Ніка-центр, 280 с.
- Михайлов, В., Загнітко, В., Курило, М. (2017). Перспективи інвестицій в мінерально-сировинний комплекс України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (76), 47–51.
- Михайлов, В.А., Карпенко, О.М., Курило, М.М. та ін. (2018). Горючі корисні копалини України та їх геолого-економічна оцінка. Підручник. К.: Київський університет, 655 с.
- Мінеральні ресурси України. Щорічник (2020). К.: ДВНП "Геоінформ України", 270 с. Отримано з [http://geoinf.kiev.ua/M\\_R\\_2020.pdf](http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf)
- Политика США в отношении критических полезных ископаемых. (2019). Металл. Новости. Отримано з <https://ru.institut-seltene-erden.de/die-us-politik-im-umgang-mit-kritischen-mineralien/>
- Проект Закону України від 26.10.2021 р. № 6227 "Про внесення змін до Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року. (2021). Отримано з <https://ips.ligazakon.net/document/J1062871>
- Проект Кодексу про надра. (2021).
- Рудько, Г.І., Плотников, О.В., Курило, М.М., Радованов, С.В. (2010). Економічна геологія родовищ залізистих кварцитів. К.: Академпреса, 272 с.
- Рудько, Г., Курило, М., Радованов, С. (2011). Геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин. К.: "АДЕФ-Україна", 367 с.
- Рудько, Г.І., Озерко, В.М., Шепель, І.В. (2015). Геологія і геолого-економічна оцінка родовищ каоліну України. Київ-Чернівці: Букрек, 336 с.
- Рудько, Г.І., Бала, Г.Р. (2021). Критична мінеральна сировина та її перспективи в Україні. *Мін. ресурси України*, 2, 3–14.
- Шнюков, Е.Ф., Орловський, Г.Н., Панченко, Н.А. и др. (1993). Марганцевые руды Украины К.: Наук. думка, 172 с.
- Bartekova, E., Kemp, R. (2016). Critical raw material strategies in different world regions/MERIT Working Papers 2016–005. United Nations University. Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (MERIT), 2016. Отримано з <https://www.merit.unu.edu/publications/working-papers/abstract/?id=5933>
- Canada releases list of 31 critical minerals; domestic production, global impact (2021). Green Car Congress.
- Canada's list of critical minerals. (н.д.). Отримано з <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/critical-minerals/23414>
- <https://www.greencarcongress.com/2021/03/20210315-canada31.html>

Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability (2020). European Commission, Brussels, 3.9.2020. Отримано з <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0474>

Critical and Strategic Minerals Importance to the U.S. Economy. (н.д.). Отримано з <https://www.smenet.org/What-We-Do/Technical-Briefings/Critical-and-Strategic-Minerals-Importance-to-the>

Critical commodities for a high-tech world: Australia's potential to supply global demand. (2013). Отримано з <https://www.ga.gov.au/data-pubs/data-and-publications-search/publications/australian-minerals-resource-assessment/critical-commodities>

Critical raw materials. (н.д.). Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. European Commission. Отримано з [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en)

Cuney, M., Emetz, A., Mercadier, J., Mykchaylov, V., Shunko, V., Yuslenko, A. (2011). Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: A review of some of the major deposits and genetic constraints. *Ore Geology Reviews*, XXX, p. 25–49.

European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report. (2020). Отримано з <https://www.researchgate.net/publication/344124852>.

Global Mineral Data Portal Unveiled by International Partnership. (2021). Отримано з <https://www.usgs.gov/news/technical-announcement/global-mineral-science-data-portal-unveiled-international-partnership>

Mykhailov, V., Kurylo, M. (2015). Estimation of flux reserve and resource base of Ukraine. *Geology, Mineral Processing, Oil and Gas Exploration. 15th GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Albena, Bulgaria. Conference Proceedings*, Vol. I, p. 135–140.

Mykhailov, V., Hrinchenko, O. (2018). Geology, mining industry and environmental problems of Ukraine. *12th International Scientific Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*.

Mykhailov, V.A., Zagnitko, V.M., Lyzhachenko, N.M. (2021). Monitoring of graphite production in Ukraine. *15th International Scientific Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*.

The methodology to identify CRMs. Critical raw materials. Official website of the European Union. (н.д.). Отримано з [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en)

Towards a Historical Understanding of Critical Raw Materials. Suggestions from a History of Technology Perspective. (2018). *GAIA*, 4, p. 373–378.

World Mining Data. (2021). B: Vol. 36. C. Reichl, M. Schatz. Mineral Production. Vienna, 266 p.

## References

Bartekova, E., Kemp, R. (2016). Critical raw material strategies in different world regions/MERIT Working Papers 2016–005. United Nations University. Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (MERIT), 2016. Retrieved from <https://www.merit.unu.edu/publications/working-papers/abstract/?id=5933>

Canada releases list of 31 critical minerals; domestic production, global impact. (2021). Green Car Congress.

Canada's list of critical minerals. (н.д.). Retrieved from <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/critical-minerals/23414>. <https://www.greencarcongress.com/2021/03/20210315-canada31.html>

Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability (2020). European Commission. Brussels, 3.9.2020. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0474>

Critical and Strategic Minerals Importance to the U.S. Economy. (н.д.). Retrieved from <https://www.smenet.org/What-We-Do/Technical-Briefings/Critical-and-Strategic-Minerals-Importance-to-the>

Critical commodities for a high-tech world: Australia's potential to supply global demand. (2013). Retrieved from <https://www.ga.gov.au/data-pubs/data-and-publications-search/publications/australian-minerals-resource-assessment/critical-commodities>

Critical raw materials. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. European Commission. (н.д.). Retrieved from [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en)

Cuney, M., Emetz, A., Mercadier, J., Mykchaylov, V., Shunko, V., Yuslenko, A. (2011). Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: A review of some of the major deposits and genetic constraints. *Ore Geology Reviews*, XXX, p. 25–49.

Dovgij, S.O., Shestopalov, V.M., Korzhnev, M.M. et al. (2007). Restructuring of the mineral and raw-material base of Ukraine and information software. K.: Nauk. dumka, 400 p. [In Ukrainian]

Draft Code of Nadra. (2021).

Draft Law of Ukraine dated October 26, 2021 N 6227 "On the introduction of changes to the Central State program for the development of the mineral-

raw-material base of Ukraine for the period until 2030." Retrieved from <https://ips.ligazakon.net/document/JI062871> [In Ukrainian]

European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report. (2020). Electronic resource. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/344124852>.

Gailin, A.M., Rudko, G.I., Chikova, I.V. (2017). Mining-chemical potential of Ukraine. Kiev-Chernivtsi: Bookrek, 192 p. [In Russian]

Genetic types and patterns of distribution of uranium deposits in Ukraine. (1995). K.: Nauk. Dumka, 396 p. [In Russian]

Global Mineral Data Portal Unveiled by International Partnership. (2021). Retrieved from <https://www.usgs.gov/news/technical-announcement/global-mineral-science-data-portal-unveiled-international-partnership>

Gursky, D.S. (2008). The conception of the State industrial raw-materials politic of the use of the strategic significant for the country economic minerals and rocks. Lviv: ZUKTS, 192 p. [In Ukrainian]

Gursky, D.S., Esipchuk, K.Yu., Kalinin, V.I. et al. (2006<sup>1</sup>). Mineral deposits of Ukraine. Vol. I. Metalliferous mineral deposits. Kyiv-Lviv: "Center of Europe", 785 p. [In Ukrainian]

Gursky, D.S., Esipchuk, K.Yu., Kalinin, V.I. et al. (2006<sup>2</sup>). Mineral deposits of Ukraine. Vol. II. Industrial mineral deposits. Kyiv-Lviv: "Center of Europe", 552 p. [In Ukrainian]

Investment atlas of the subsoil user. Strategic and critical minerals. (2021). Government Service of Geology and Bosom of Ukraine. [In Ukrainian]

Kulish, E.A., Plotnikov, A.V. (2005). Geological factors of the economic value of iron ore deposits. K: Logos, 292 p. [In Russian]

Mineral resources of Ukraine. Yearbook (2020). K.: DVNP Geoinform of Ukraine, 270 p. Retrieved from [http://geoinf.kiev.ua/M\\_R\\_2020.pdf](http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf) [In Ukrainian]

Mykhailov V.A., Vinogradov G.F., Kurylo, M.V. et al. (2008). Industrial minerals and rocks of Ukraine. Textbook. K.: Kiev University, 494 p. [In Ukrainian]

Mykhailov, V., Hrinchenko, O. (2018). Geology, mining industry and environmental problems of Ukraine. *12th International Scientific Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*.

Mykhailov, V., Kurylo, M. (2015). Estimation of flux reserve and resource base of Ukraine. *Geology, Mineral Processing, Oil and Gas Exploration. 15th GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Albena, Bulgaria. Conference Proceedings*, Vol. I, p. 135–140.

Mykhailov, V., Zagnitko, V., Kurylo, M. (2017). Prospects for investment in mineral resources sector of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (76), 47–51. [In Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Karpenko, O.M., Kurylo, M.M. et al. (2018). Fuel minerals of Ukraine and their geological and economic evaluation. Textbook. K.: Kyiv University, 655 p. [In Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Kurylo, M.M. (2010). Row-material Base of Ukrainian Flux Ores. K.: Nika-center, 200 p. [In Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Shevchenko, V.I., Ogar V.V. et al. (2007). Metalliferous mineral deposits of Ukraine. Textbook. K.: Kiev University, 463 p. [In Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Vakarchuk, S.G., Zeikan, O.Yu. et al. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. Book VIII. Theoretical substantiation of unconventional hydrocarbon resources in sedimentary basins of Ukraine. K.: Nika-center, 280 p. [In Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Zagnitko, V.M., Lyzhachenko, N.M. (2021). Monitoring of graphite production in Ukraine. *15th International Scientific Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*.

Rudko, G., Kurylo, M., Radovanov, S. (2011). Geological and economic assessment of mineral deposits. K.: "ADEF-Ukraine", 367 p. [In Ukrainian]

Rudko, G.I. Bala, G.R. (2021). Critical mineral raw materials and their prospects in Ukraine. *Min. resources of Ukraine*, 2, 3–14. [In Ukrainian]

Rudko, G.I., Ozerko, V.M., Shepel, I.V. (2015). Geology and geological and economic assessment of kaolin deposits in Ukraine. Kiev-Chernivtsi: Bookrek, 336 p. [In Ukrainian]

Rudko, G.I., Plotnikov, O.V., Kurylo, M.M., Radovanov, S.V. (2010). Economic geology of the ferruginous quartzites. K.: Academpres, 272 p. [In Ukrainian]

Shnyukov, E.F., Orlovsky, G.N., Panchenko, N.A. et al. (1993). Manganese ores of Ukraine K.: Nauk. dumka, 172 p. [In Russian]

The methodology to identify CRMs. Critical raw materials. Official website of the European Union. (н.д.). Electronic resource. Retrieved from [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en)

Towards a Historical Understanding of Critical Raw Materials. Suggestions from a History of Technology Perspective. (2018). *GAIA*, 4, p. 373–378.

US Policy on Critical Minerals. (2019). Metal. News. Retrieved from <https://ru.institut-seltene-erden.de/die-us-politik-im-umgang-mit-kritischen-mineralien/> [In Russian]

World Mining Data. (2021). In: Vol. 36., C. Reichl, M. Schatz. Mineral Production. Vienna, 266 p.

Zagnitko, V., Mykhailov, V., Krivdik, S., Sidorchuk, V. (2017). Genetic features and resources of rare metal deposits of the Ukrainian Shield. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (76), 58–65. [In Ukrainian]

Zaritsky, O.I., Lebid, M.I., Kulish, E.O. et al. (1994). Ore resources of black metallurgy. *Min. resources of Ukraine*, 1, 10–13. [In Ukrainian]

Надійшла до редколегії 09.06.22

V. Mykhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,  
E-mail: vladvam@gmail.com;  
S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,  
E-mail: vsa@univ.net.ua;  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,  
90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;  
S. Paiuk, Head of State Commission of Ukraine on Mineral Resources  
State Commission of Ukraine on Mineral Resources,  
18/7 Almazova Str. office 816, Kyiv, 01133, Ukraine

#### SYSTEM ANALYSIS OF THE MINERAL RAW MATERIAL BASE OF STRATEGIC MINERALS OF UKRAINE

*A systematic analysis of the mineral resource base (MRB) of strategically important minerals for the Ukrainian economy is carried out. Four categories of strategic minerals from the point of view of their investment attractiveness are identified: traditional (iron, manganese, titanium, uranium, kaolin, sand molding, building stones, quartz raw materials, refractory clay); highly promising (rare earths, zirconium and hafnium, lithium, scandium, germanium, graphite, potassium salts, abrasive raw materials, piezooptical raw materials); promising (nickel, cobalt, chromium, aluminum, copper, tantalum and niobium, beryllium, gold, phosphorite, apatite, fluorspar, glauconite, limestones for sugar industry, flux limestones and dolomites, bentonite clays, feldspar, rough semi-precious stones); with unclear prospects (vanadium, lead and zinc, tungsten, molybdenum, platinum minerals, strontium, magnesium, arsenic, rubidium, cesium, barite, boron, dawsonite, bromine and iodine, mineral sorbents, high alumina raw materials, raw materials for mineral production of paints, fluorine, sulfur). Factors and criteria of investment attractiveness are determined and its expert assessment for deposits of metallic and industrial minerals and rocks of Ukraine is carried out, ways of creation of harmoniously developed balanced MRB of strategic minerals are shown.*

*Keywords: mineral resource base; deposit, strategic minerals, investment attractiveness.*

УДК 550.93

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.06>

Л. Степанюк, д-р геол. наук, проф., чл.-кор. НАН України,  
E-mail: [stepaniuk@nas.gov.ua](mailto:stepaniuk@nas.gov.ua);  
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України,  
просп. Палладіна, 34, Київ, Україна;  
В. Загнітко, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,  
E-mail: [zagnitkow@i.ua](mailto:zagnitkow@i.ua);  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;  
Т. Довбуш, наук. співроб.,  
E-mail: [tetyana.dovbush1@gmail.com](mailto:tetyana.dovbush1@gmail.com);  
Н. Коваленко, мол. наук. співроб.,  
E-mail: [kovnat.igmr@gmail.com](mailto:kovnat.igmr@gmail.com);  
О. Зюльцле, канд. геол. наук, наук. співроб.,  
E-mail: [olegzjults@gmail.com](mailto:olegzjults@gmail.com);  
Т. Яськевич, канд. геол. наук, наук. співроб.,  
E-mail: [albobrov@ukr.net](mailto:albobrov@ukr.net);  
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України,  
просп. Палладіна, 34, Київ, Україна

## U-Pb ГЕОХРОНОЛОГІЯ КРИСТАЛІЧНИХ ПОРІД ВІЛЬШАНСЬКОГО КАР'ЄРУ (СЕРЕДНЄ ПОБУЖЖЯ, УКРАЇНСЬКИЙ ЩИТ)

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

Здійснено геохронологічні дослідження гранітоїдів із Вільшанського кар'єру Середнього Побужжя. Проаналізовано циркони та монацити із плагіогнейсів, плагіогранітів і мігматитів бузького комплексу. Встановлено, що породна асоціація, яку складають мігматити із численними ксенолітами біотитових гнейсів, плагіогнейсів, зрідка графітємісних гнейсів, амфіболітів та біотититів (хашувато-заваллівська світа бузької серії), які перетинаються жилами апліто-пегматоїдних гранітів, була сформована в результаті масштабного прояву процесів гранітизації, що розпочалися не пізніше 2,02 млрд років тому і завершилися біля 2,0 млрд років тому. Вік метаморфічних вмісних порід відповідає архейським значенням уран-свинцевих датвань.

**Ключові слова:** циркони, монацити, плагіогнейси, плагіограніти, мігматити, ізотопний вік, конкордія.

**Вступ.** Середнє Побужжя є одним із найскладніших за геологічною будовою регіонів Українського щита. Наявність тут різноманітних гранулітових асоціацій (кальцифіри із форстеритом, гіперстенові гнейси, залізисті кварцити із ромбічними піроксенами, графітові та гранатові гнейси з високими термобаричними параметрами тощо), які ускладнені різновіковими інтрузіями (від еоархейських до палеопротерозойських) і метасоматичними проявами, утворюють складну геологічну, тектонічну та геохронологічну мозаїку. Застосування сучасних геохронологічних методів для розшифрування послідовності геологічних подій дозволяє відтворювати геологічну історію цього дуже насиченого корисними копалинами регіону (нікол, хром, ферум, золото, манган, уран, графіт, гранат, інша неметалічна сировина) і обґрунтовано планувати та здійснювати пошуки нових родовищ. Сприяє цьому наявність у районі великої кількості природних і техногенних відслонень, одним із яких є Вільшанський кар'єр, який розташований на правому березі р. Південний Буг, приблизно в 15 км на схід від с. Вільшанка Савранського району Одеської області. Кар'єром, станом на 1991–1994 роки, розкрите поле мігматитів та гранітів. Мігматити сірі, рожево-сірі, зазвичай смугасті. Смугастість обумовлена чергуванням прошарків суттєво кварц-польовошпатового складу з незначним (перші відсотки) вмістом біотиту (лейкосома) і прошарків, складених кварцом, польовими шпатами та дрібнолузкатим біотитом, вміст якого зрідка перевищує 50 % (меланосома). У мігматитах досить часто наявні лінзоподібні тіла плагіогнейсів, амфіболітів, зрідка біотититів. Уся ця товща розсікається жилами апліто-пегматоїдних гранітів. Контакти гранітів із мігматитами чіткі, різкі. Під час розвідкування Вільшанського родовища геологами І. В. Ребезко та О. Р. Волковим у 1988 р. у свердловинах № 14 і 19 розкриті графітємісні біотитові гнейси,

імовірно, хашувато-заваллівської світи. Метою проведених досліджень було встановити вік і послідовність окремих гранітоїдних утворень Вільшанського кар'єру як показового об'єкта Середнього Побужжя, а також їхніх співвідношень із вмісними більш древніми гнейсовими комплексами.

**Історія попередніх досліджень.** Район досить активно досліджувався різними, у тому числі геохронологічними, методами, зокрема граніти, що інтродують породи хашувато-заваллівської світи бузької серії, вже датувалися уран-свинцевим ізотопним методом. Вік будинованої жили пегматиту, що розтинає продуктивну товщу Заваллівського графітового родовища, за цирконом становить  $1980 \pm 1,7$  млн років (Степанюк, 1999), аналогічний вік  $1981,2 \pm 8,4$  млн років отримано для монацитів із апліто-пегматоїдних гранатів Заваллівського рідкісноземельно-уран-торієвого рудопрояву (Бондаренко та ін., 2014). Дещо давнішими утвореннями є турмалінємісні граніти, їхній вік за акцесорним монацитом становить  $2012,3 \pm 0,7$  млн років (Степанюк та ін., 2005).

Незважаючи на такі активні дослідження району, залишається багато проблем геохімічного та петрологічного характеру, зокрема вік і роль пегматитових тіл у загальній еволюції граніто-гнейсових асоціацій, особливості мобілізації речовини більш древніх вмісних порід та їхні ролі в металогенічних наслідках геологічних перетворень.

**Об'єкти та методи дослідження.** Проаналізовано уран-свинцеві ізотопні системи циркону плагіогнейсу та плагіограніту (проби СП-9-3 та СП-9-7, відповідно), монацитів із апліто-пегматоїдного граніту (проба СП-9-12), біотитового гнейсу (проба СП-9-8к), розкритих першим уступом (станом на 1991 рік) Вільшанського кар'єру (Середнє Побужжя).

Циркони та монацити датували класичним уран-свинцевим ізотопним методом у відділі радіогеохронології

ІГМР НАН України. Методика хімічної підготовки, за якою готували зразки цих мінералів для мас-спектрометричного аналізу, описана в роботах (Щербак та ін., 1989; Krough, 1973). Для визначення вмісту урану і свинцю в монацитах використовували змішаний  $^{235}\text{U}+^{206}\text{Pb}$  траєсер, у цирконах –  $^{235}\text{U}+^{208}\text{Pb}$ .

Ізотопні дослідження свинцю та урану виконані на 8-колекторному мас-спектрометрі MI-1201 AT в мультиколекторному статичному режимі; математична обробка експериментальних даних – за програмами Pb Dat i

ISOPLOT (Ludwig, 1989, 1990). Похибки визначення віку наведені із 2σ. Для перевірки метрологічних характеристик методу використали стандарт циркону ІГМР-1 (Бартницький та ін., 1995).

**Обговорення результатів та перспективи подальших досліджень.** Уран-свинцевим ізотопним методом за цирконом із плагіогнейсу та плагіограніту (проби СП-9-3 та СП-9-7, відповідно) отримано, за ізотопним відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  числові значення віку в досить широкому інтервалі (2694–2472 млн років) (табл. 1).

Таблиця 1

Вміст урану, свинцю та ізотопний склад свинцю в цирконах із плагіогнейсу (проба СП-9-3) та плагіограніту (проба СП-9-7) Вільшанського кар'єру

| Фракція<br>Zr | Вміст (ppm) |       | Ізотопні відношення                           |                                               |                                               |                                                |                                                | Вік, млн років                                 |                                                |                                                   | D<br>(%) |
|---------------|-------------|-------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------|
|               | U           | Pb    | $\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}$ | $\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{207}\text{Pb}}$ | $\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{208}\text{Pb}}$ | $\frac{{}^{206}\text{Pb}_c}{{}^{238}\text{U}}$ | $\frac{{}^{207}\text{Pb}_c}{{}^{235}\text{U}}$ | $\frac{{}^{206}\text{Pb}_c}{{}^{238}\text{U}}$ | $\frac{{}^{207}\text{Pb}_c}{{}^{235}\text{U}}$ | $\frac{{}^{207}\text{Pb}_c}{{}^{206}\text{Pb}_c}$ |          |
| СП-9-3 заг.   | 456,6       | 213,0 | 487,5                                         | 4,7797                                        | 5,4269                                        | 0,37731                                        | 9,5985                                         | 2064                                           | 2397                                           | 2693,8                                            | 23,4     |
| СП-9-7 заг.   | 630,7       | 289,9 | 4830                                          | 5,6891                                        | 8,4401                                        | 0,41137                                        | 9,8354                                         | 2221                                           | 2419                                           | 2590,8                                            | 14,3     |
| >0,07         | 762,4       | 348,7 | 7330                                          | 6,0522                                        | 5,0419                                        | 0,38880                                        | 8,7755                                         | 2117                                           | 2315                                           | 2494,2                                            | 15,1     |
| <0,07         | 624,4       | 282,7 | 4830                                          | 5,6900                                        | 8,4059                                        | 0,40509                                        | 9,6837                                         | 2192                                           | 2405                                           | 2590,5                                            | 15,4     |
| <0,05         | 735,0       | 305,1 | 3340                                          | 6,0150                                        | 12,560                                        | 0,38551                                        | 8,6477                                         | 2102                                           | 2302                                           | 2483,8                                            | 15,4     |
| M             | 877,8       | 450,6 | 3250                                          | 6,0515                                        | 2,6889                                        | 0,38567                                        | 8,5922                                         | 2103                                           | 2296                                           | 2472,3                                            | 14,9     |

Примітка. Заг. – мультизернова наважка кристалів циркону, не поділених на фракції; М – мультизернова наважка кристалів циркону II електромагнітної фракції. Поправка на звичайний свинець уведена за Стейсі та Крамерсом на вік 2600 млн років.

Вік, отриманий за верхнім перетином конкордії дискордією, розрахованою для цирконів плагіограніту проби СП-9-7 (див. табл. 1), становить  $3116 \pm 133$  млн років, і  $1689 \pm 96$  млн років – за нижнім. Середнє зважене значення віку за ізотопним відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  –  $2512 \pm 94$  млн років. Такі високі значення віку логічно пояснюються тим, що кристали циркону складні, утворені на 80–99 % об'єму реліктовими ядрами, на які наростають тонкі оболонки, зазвичай на вершинках та окремих ребрах (рис. 1).

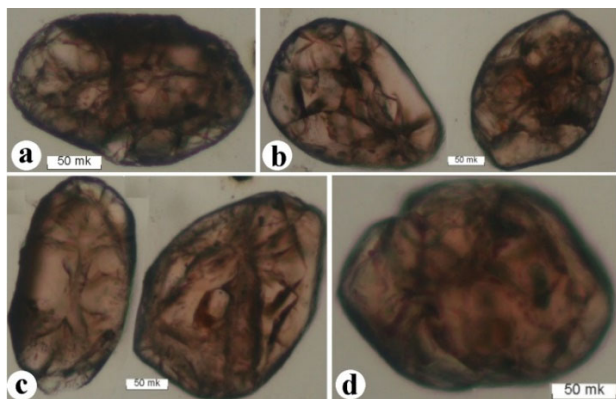


Рис. 1. Мікрофотографії зрізів кристалів циркону із біотитового плагіогнейсу (проба СП-9-3), поляризаційний просвічуючий мікроскоп, за одного ніколя

Для з'ясування часу виявлення гранітоїдного магматизму уран-свинцевим ізотопним методом датували монацити із жиллоподібного тіла апліто-пегматоїдного граніту потужністю біля 80 см, відслоненого в північному борту кар'єру, а також монацити із біотитового гнейсу, що як ксеноліт знаходився в мігматитах, розкритих західним бортом кар'єру (станом на 1992 рік).

**Граніт апліто-пегматоїдний біотит-мікроклін-плагіоклазовий** (проба СП-9-12), північний борт Вільшанського кар'єру (станом на 1992 рік). Порода рожево-сіра нерівномірностерниста, зі слабо проявленою смугастістю. Смоги вирізняються інколи кольором, а переважно розміром зерен і співвідношеннями між породоутворю-

вальними мінералами, представленими плагіоклазом, калієвим польовим шпатом, кварцом і біотитом. Із вторинних трапляється серицит, хлорит та мінерали групи епідоту. Із акцесорних мінералів наявні апатит, циркон, монацит. Рудні представлені магнетитом і піритом. Структура граніту лепідогранобластова, ділянками порфіроподібна.

Мінеральний склад (%): плагіоклаз – біля 40, КПШ (мікроклін) – 25–30, кварц – 25–30, біотит – 1–2.

Хімічний склад (ваг. %):  $\text{SiO}_2$  – 73,83;  $\text{TiO}_2$  – 0,19;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 13,83;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,51;  $\text{FeO}$  – 0,64;  $\text{MnO}$  – <0,01;  $\text{MgO}$  – 0,72;  $\text{CaO}$  – 1,26;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 3,74;  $\text{K}_2\text{O}$  – 4,71;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,01;  $\text{S}$  – <0,02;  $\text{H}_2\text{O}$  – <0,01; ВПП – 0,41; сума – 99,85.

Плагіоклаз утворює зазвичай ксеноморфні зерна, зрідка трапляються таблитчасті. Зерна полісинтетично здвійниковані. За кутом симетричного погасання ( $+12^\circ$ ) є олігоклазом. Плагіоклаз досить свіжий, окремі зерна ділянками заміщуються серицитом, мінералами групи епідоту.

Калієвий польовий шпат (мікроклін) у крупних виділеннях утворює ксеноморфні зерна розміром 3–5 мм, має мікроклінову ґратку, слабо пелітизований. Трапляються деформовані зерна, з різко вираженим хвилястим погасанням, розбиті тріщинками. Окремі крупні кристали містять дрібні релікти плагіоклазу, пластинки біотиту. У дрібнозернистій масі гранобластової структури спостерігається у свіжих чистих зернах із характерною ґратчастою будовою. Зерна ксеноморфні, їхній розмір варіює від кількох часток міліметра до 0,5 мм.

Кварц спостерігається у ксеноморфних зернах із виразним хвилястим погасанням. Зерна здебільшого тріщинуваті, їхній розмір коливається від кількох сотих міліметра до 2 мм.

Біотит зазвичай утворює скупчення дрібних пластинок, зрідка хлоритизованих, розміром біля 0,3 мм. З біотитом досить часто асоціюють апатит і монацит, зрідка циркон.

У монациті є кілька відмін, які відрізняються як за забарвленням, так і за формою кристалів. Їм притаманна широка кольорова гама, від світло-жовтих прозорих (зазвичай дрібних) поодиноких зерен, через коричнюватожовті напівпрозорі, сірувато-коричневі, коричнево-сірі (переважають) до майже чорних, непрозорих (рис. 2). За формою переважають округлі та пляшкоподібні кристали, у яких, незважаючи на добре розвинені ребра,

контури здебільшого заокруглені. Менш поширені видовжені ( $K_{\text{вид.}} 1,5-2,0$ ) зерна. Поверхня в більшості зерен дрібноямчата до шагреневої.

У полірованих зрізах темних (коричневих, коричнево-сірих, майже чорних) кристалів монациту виявляються як окремі досить крупні непрозори включення (рис. 2 ф, і), так і тонкодисперсна непрозора речовина (рис. 2 с, е, g, h, k, l), при цьому найчастіше найбільш "забрудненими" є центральні частини кристалів. Забарвлення світло-коричневих кристалів, найвірогідніше, обумовлене гідроксидами заліза, у будь-якому разі ділянки з рудим забарвленням у кристалах приурочені до мікротріщин (рис. 2 б).

Імовірно, темна тонкодисперсна речовина у кристалах монациту (рис. 2 g, h) утворилася в результаті тектонічних деформацій кристалів, можливо, за рахунок перерозподілу та розсіювання чорних непрозорих включень (рис. 2 ф, і). У будь-якому разі в деяких зрізах темних кристалів добре видно сліди їхньої тектонічної деформації (рис. 2 е, k, і).

Для визначення віку граніту радіогеохронологічні дослідження кристалів монациту проводили у два етапи. На першому етапі використали мультизернові наважки розмірних фракцій найбільш поширених темніших і більш крупних (1-3) та дещо світліших і переважно дрібніших зерен (4 і 5). Результати датування наведені в табл. 2.

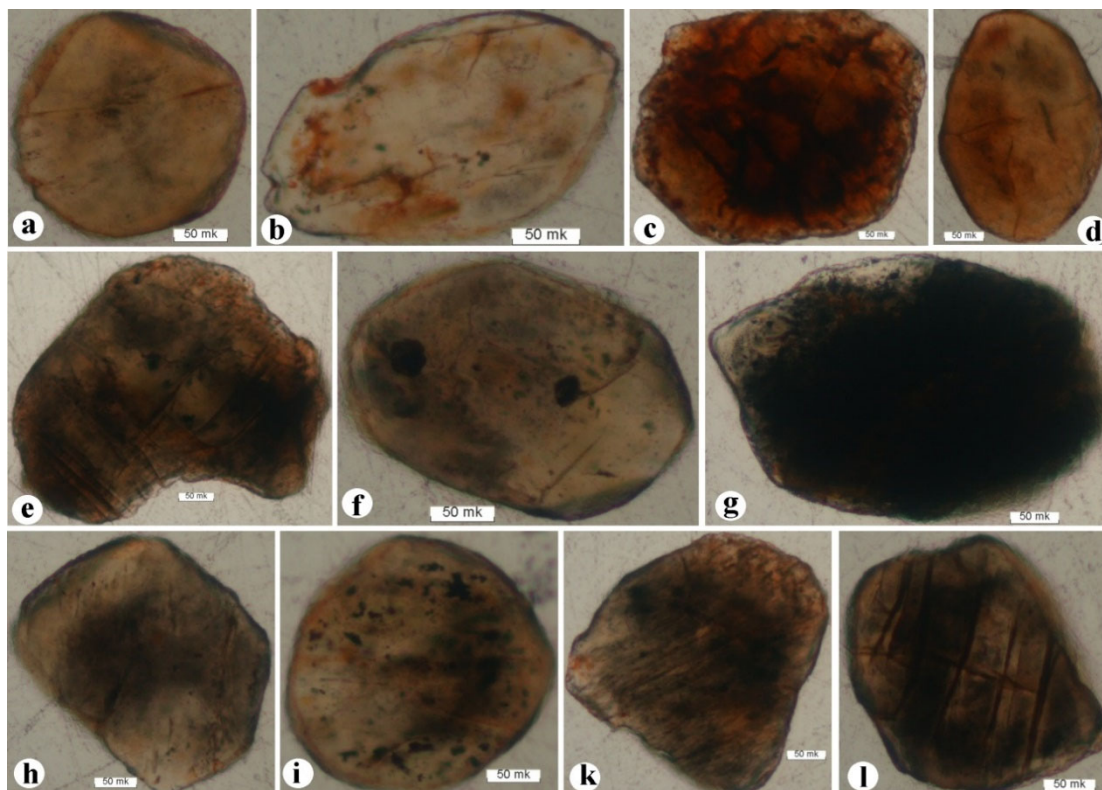


Рис. 2. Мікрофотографії зрізів кристалів монациту із граніту (проба СП-9-12), поляризаційний просвічуючий мікроскоп, за одного ніколя

Таблиця 2

Вміст урану, плумбуму та ізотопний склад плумбуму в монацитах із граніту (проба СП-9-12), Вільшанський кар'єр

| Фракція<br>Mnz | Вміст (ppm) |      | Ізотопні відношення                       |                                           |                                           |                                            |                                            | Вік, млн років                             |                                            |                                               | D<br>(%) |
|----------------|-------------|------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------|
|                | U           | Pb   | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}_f}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}_f}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}_f}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}_f}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}_f}{^{206}\text{Pb}_f}$ |          |
| 1              | 4536        | 8143 | 2024                                      | 7,7682                                    | 0,20343                                   | 0,33984                                    | 5,7297                                     | 1886                                       | 1936                                       | 1989,8                                        | 5,2      |
| 2              | 4663        | 8458 | 2170                                      | 7,8076                                    | 0,21474                                   | 0,35903                                    | 6,0429                                     | 1978                                       | 1982                                       | 1986,7                                        | 0,5      |
| 3              | 4478        | 8681 | 1700                                      | 7,6840                                    | 0,19535                                   | 0,35439                                    | 5,9828                                     | 1956                                       | 1973                                       | 1992,1                                        | 1,8      |
| 4              | 4941        | 9519 | 6305                                      | 7,9994                                    | 0,19621                                   | 0,35609                                    | 6,0403                                     | 1964                                       | 1982                                       | 2000,6                                        | 1,8      |
| 5              | 5046        | 9832 | 7410                                      | 8,0412                                    | 0,19255                                   | 0,35477                                    | 6,0014                                     | 1957                                       | 1976                                       | 1995,7                                        | 1,9      |

Примітка. Поправка на звичайний плумбум уведена за Стейсі та Крамерсом на вік 2000 млн років. 1–3 – розмірні фракції темно-коричневих до смоляно-чорних непрозорих зерен із заокругленими контурами, отримані скочуванням по нахиленій площині; 4–5 – жовтувато-коричневі, світло-коричневі напівпрозорі зерна, промиті у слабкому розчині соляної кислоти.

Вік монациту за верхнім перетином конкордії дискордією, розрахованою за даними, наведеними в табл. 2, становить  $1995 \pm 20$  млн років, і  $126 \pm 889$  млн років – за нижнім. Середньозважене (за відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) значення віку –  $1994 \pm 8,6$  млн років (рис. 3).

На другому етапі датування використали мультизернові наважки розмірних фракцій дрібних світло-жовтих кристалів. Аналітичні результати датування наведені в табл. 3.

За верхнім перетином конкордії з лінією регресії, розрахованою за даними, наведеними в табл. 3, отримано вік  $2009,1 \pm 3,8$  млн років (рис. 4) і  $-31 \pm 2,172$  млн років – за нижнім,  $\text{СКЗВ} = 0,18$ . Нижній перетин геологічного сенсу не має. Середнє зважене значення віку за ізотопним відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  дорівнює  $2008,4 \pm 0,8$  млн років. Таким чином, і для темніших кристалів монациту, і для світло-жовтого їхнього різновиду отримано значення віку, що в межах похибки збігаються. Слід зазначити, що

більш темні кристали показали за відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  дещо менший і більш варіативний вік (див. табл. 2), що, на нашу думку, обумовлено порушенням замкненості їхньої уран-свинцевої ізотопної системи в

результаті тектонічної деформації, яка, імовірно, проявилася незадовго після кристалізації граніту. При цьому світло-жовті кристали не зазнали деформації, їхня уран-свинцева ізотопна система не порушувалася.

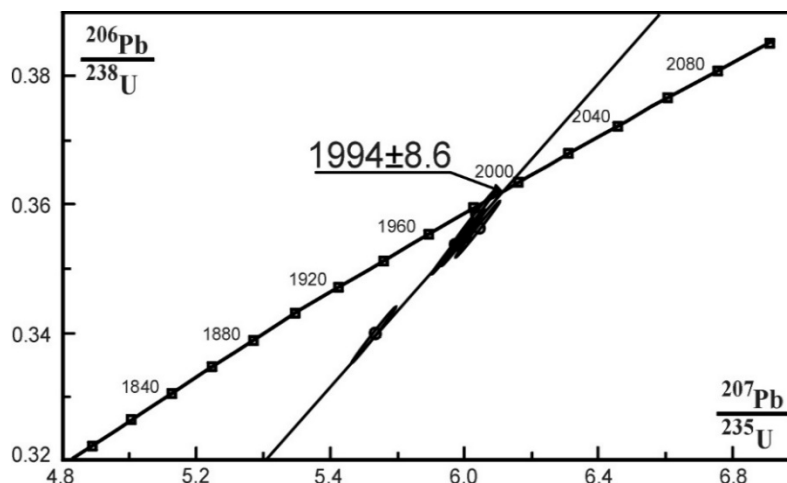


Рис. 3. Уран-свинцева діаграма з конкордією для монацитів із граніту (проба СП-9-12), Вільшанський кар'єр

Таблиця 3

Вміст урану, плумбуму та ізотопний склад плумбуму у світло-жовтих кристалах монациту із граніту (проба СП-9-12), Вільшанський кар'єр

| Фракція<br>Mnz | Вміст (ppm) |      | Ізотопні відношення                       |                                           |                                           |                                            |                                            | Вік, млн років                             |                                            |                                               | D<br>(%) |
|----------------|-------------|------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------|
|                | U           | Pb   | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}_r}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}_r}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}_r}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}_r}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}_r}{^{206}\text{Pb}_r}$ |          |
| 1              | 4290        | 8679 | 3520                                      | 7,8585                                    | 0,20265                                   | 0,38309                                    | 6,5287                                     | 2091                                       | 2050                                       | 2008,9                                        | -4,1     |
| 2              | 3883        | 7869 | 2960                                      | 7,8162                                    | 0,19947                                   | 0,37850                                    | 6,4492                                     | 2069                                       | 2039                                       | 2008,5                                        | -3,0     |
| 3              | 3434        | 7502 | 1700                                      | 7,6190                                    | 0,18436                                   | 0,38071                                    | 6,4862                                     | 2080                                       | 2044                                       | 2008,3                                        | -3,5     |
| 4              | 2946        | 6836 | 15430                                     | 8,0457                                    | 0,17366                                   | 0,38818                                    | 6,6128                                     | 2114                                       | 2061                                       | 2008,2                                        | -5,3     |

Примітка. Поправка на звичайний плумбум уведена за Стейсі та Крамерсом на вік 2010 млн років. 1–4 – мультизернові наважки розмірних фракцій світло-жовтих водяно-прозорих кристалів монациту. Розмірні фракції отримані скочуванням по нахилений площині.

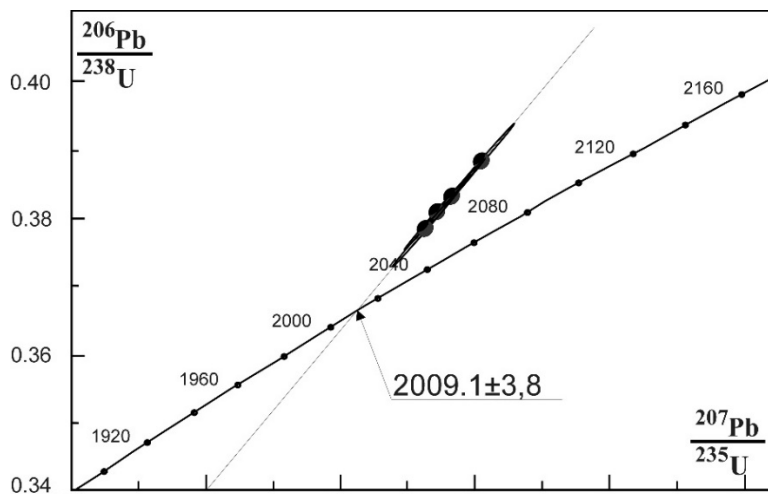


Рис. 4. Уран-свинцева діаграма з конкордією для світло-жовтих кристалів монациту із граніту (проба СП-9-12), Вільшанський кар'єр

**Біотитовий гнейс** (проба СП-9-8к) – дрібнозерниста рожево-сіра порода. Структура лепідогранобластова, текстура гнейсувата.

Гнейс складений (%): плагіоклазом – 40–45; кварцом – 25–30; мікрокліном – 10–15; біотитом – 10–15. В акцесорних кількостях наявні апатит, циркон, монацит. Рудні мінерали представлені магнетитом і піритом.

Хімічний склад (ваг.%):  $\text{SiO}_2$  – 68,08;  $\text{TiO}_2$  – 0,78;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 14,43;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 2,13;  $\text{FeO}$  – 3,25;  $\text{MnO}$  – 0,10;  $\text{MgO}$  – 2,23;

$\text{CaO}$  – 2,03;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 3,34;  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,75;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,22;  $\text{S}$  – 0,02;  $\text{H}_2\text{O}$  – <0,01; ВПП – 0,56; сума – 99,90.

Плагіоклаз утворює досить свіжі ксеноморфні, зрідка ізометричні зерна з нерівними краями та хвилястим погасанням, розміром від 0,02 до 1,2 мм. Зерна характеризуються полісинтетичним двійникованням, найчастіше слабо вираженим, подекуди двійники слабо зігнуті. Вторинні зміни – серицитизація, проявлені лише в окремих зернах і представлені тонкими лусками серициту.

Кварц спостерігається у ксеноморфних зернах із нерівними краями та різко вираженим хвилястим згасанням. Розміри зерен варіюють від 0,02 до 0,4 мм.

Мікроклін утворює досить свіжі, зазвичай ксеноморфні зерна із характерною ґратчастою будовою, розміром до 1,2 мм. Переважно наявний у дрібнозернистій гранобластовій кварц-плагіоклазовій масі, зрідка утворює окремі відносно крупні зерна розміром 3–4 мм.

Біотит наявний у вигляді скупчень, зрідка утворює окремі луски, зазвичай орієнтовані в одному напрямку. Розміри лусок досягають 1 мм за видовженням, найчастіше 0,3–0,4 мм. Характеризується різким плеохроїзмом від світло- до темно-бурого. Окремі луски деформовані, що проявляється у хвилястому згасанні, деякі частково хлоритизовані.

Монацит утворює світло-жовті, переважно прозорі, меншою мірою водяно-прозорі, дископодібні, більш дрібні – пляшкоподібні зерна із заокругленими контурами та шагреновою, зрідка гладенькою блискучою

поверхнею. Зерна різною мірою озалізовані, що ускладнює їхню прозорість.

Для визначення віку монациту використали мультизернові наважки розмірних фракцій світло-жовтих водяно-прозорих зерен, переважно із гладенькою блискучою поверхнею. Розмірні фракції отримали, сколюючи кристали по нахилений площині. Аналітичні результати наведено в табл. 4.

Вік монациту за верхнім перетином конкордії лінійної регресії, розрахованою за даними, наведеними в табл. 4, становить  $2008 \pm 37$  млн років (рис. 5), і  $563 \pm 2785$  млн років – за нижнім, СКЗВ – 0,46. Середнє зважене значення віку за ізотопним відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2021,1 \pm 1,2$  млн років, яке ми, зважаючи на незначну дискордантність (табл. 4), приймаємо за вік монациту. Зважаючи, що кристалізація монациту у гнейсі найвірогідніше обумовлена процесами гранітизації та формування мігматиту, його вік характеризує один із етапів, імовірно завершальний, утворення мігматиту.

Таблиця 4

Вміст урану, плумбуму та ізотопний склад плумбуму у світло-жовтих кристалах монациту із гнейсу (проба СП-9-8к), Вільшанський кар'єр

| Фракція Mnz | Вміст (ppm) |       | Ізотопні відношення                       |                                           |                                           |                                          |                                          | Вік, млн років                           |                                          |                                           | D (%) |
|-------------|-------------|-------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|-------|
|             | U           | Pb    | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ |       |
| 1           | 5102        | 9088  | 3360                                      | 7,7894                                    | 0,23781                                   | 0,38344                                  | 6,5852                                   | 2092                                     | 2057                                     | $2022,5 \pm 1,3$                          | –3,5  |
| 2           | 5679        | 10154 | 3520                                      | 7,8076                                    | 0,23501                                   | 0,38132                                  | 6,5425                                   | 2082                                     | 2052                                     | $2020,8 \pm 1,3$                          | –3,1  |
| 3           | 6085        | 10762 | 2830                                      | 7,7549                                    | 0,23901                                   | 0,38182                                  | 6,5485                                   | 2085                                     | 2052                                     | $2020,1 \pm 1,5$                          | –3,2  |
| 4           | 5489        | 10176 | 2915                                      | 7,7640                                    | 0,22443                                   | 0,38081                                  | 6,5305                                   | 2080                                     | 2050                                     | $2019,9 \pm 3,2$                          | –3,0  |
| 5           | 4982        | 9217  | 2230                                      | 7,6722                                    | 0,22467                                   | 0,37959                                  | 6,5171                                   | 2074                                     | 2048                                     | $2022,0 \pm 4,8$                          | –2,6  |
| 6           | 5002        | 9812  | 1515                                      | 7,5154                                    | 0,20964                                   | 0,37929                                  | 6,5072                                   | 2073                                     | 2047                                     | $2020,7 \pm 1,4$                          | –2,6  |

Примітка. Поправка на звичайний плумбум уведена за Стейсі та Крамерсом на вік 2020 млн років. 1–6 – мультизернові наважки розмірних фракцій світло-жовтих кристалів. D – дискордантність.

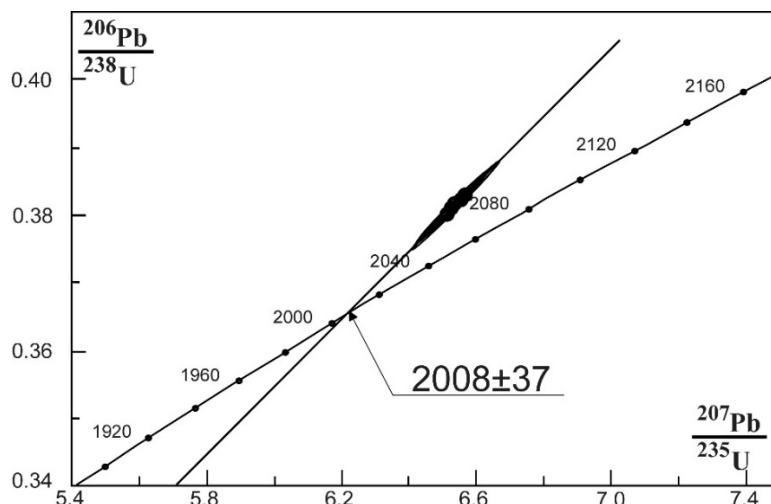


Рис. 5. Уран-свинцева діаграма з конкордією для світло-жовтих кристалів монациту із гнейсу (проба СП-9-8к), Вільшанський кар'єр

Щодо перспектив подальших досліджень геохронології Середнього Побужжя важливо зазначити необхідність встановлення більш точного віку субстрату ультраметаморфічних гранітоїдів і пегматитів, оскільки все ще залишаються незрозумілими вік, масштаби й особливості мобілізації утворень нижніх (архейських?) структурних поверхів у формуванні палеопротерозойських породних і рудних комплексів.

#### Висновки

1. Вік плагіогнейсу та плагіограніту за цирконом, отриманий за ізотопними відношеннями  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , лежить у досить широкому інтервалі – 2694–2472 млн років.

2. Породна асоціація мігматитів із численними ксенолітами біотитових гнейсів, плагіогнейсів, зрідка графітвмісних гнейсів, амфіболітів та біотититів (хащувато-заваллівська світа бузької серії), що перетинаються жилами апліто-пегматоїдних гранітів, розкрита Вільшанським кар'єром, була сформована в результаті масштабного прояву процесів гранітизації, що розпочалися не пізніше 2,02 млрд років тому і завершилися біля 2,0 млрд років тому.

У подальших дослідженнях доцільно залучити інші геохімічні системи (розподіл R3E, Sm-Nd, Lu-Hf тощо) для побудови більш детальних петрологічних та геохронологічних схем Середнього Побужжя.

## Список використаних джерел

Бартицкий, Е.Н., Бибилова, Е.В., Верхогляд, В.М., Легкова, Г.В., Скобелев, В.М., Терещ, Г.Я. (1995). ИГМР-1 – Международный стандарт циркона для уран-свинцовых изотопных исследований. *Геохимия и рудообразование*, 21, 164-167.

Бондаренко, С.М., Карли, З.В., Степанюк, Л.М., Сьомка, В.О., Донський, М.О., Сьомка, Л.В. (2014). Заваллівський рудопроєв калій-уранової формації: мінералогія, геохімія, час формування. *Геохімія та рудоутворення*, 34, 3-17.

Степанюк, Л.М. (1999). Последовательность проявления геологических процессов в породах бугской серии, Среднее Побужье. *Минерал. журнал*, 21, 5-6, 86-92.

Степанюк, Л.М., Скобелева, В.М., Довбуш, Т.І., Бобров, О.Б., Меркушин, І.Є. (2005). Час вкорінення гранітів в породи бузької серії (на прикладі Хащувато-Заваллівської структури). *Збірник наукових праць УкрДГРІ*, 2, 26-32.

Щербак, М.П. Артеменко, Г.В., Бартицкий, Е.Н., Верхогляд, В.М., Комаристый, А.А., Лесная, И.М., Мицкевич, Н.Ю., Пономаренко, А.Н., Скобелев, В.М., Щербак, Д.Н. (1989). Геохронологическая шкала докембрия Украинского щита. Киев: Наук. думка, 140 с.

Krough, T.E. (1973). A law contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 3, 485-494.

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

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

## References

Bartnitskiy, Ye.N., Bibikova, Ye.V., Verkhoglyad, V.M., Legkova, G.V., Skobelev, V.M., Terets, G.YA. (1995). IGMR-1 – Mezhdunarodnyy standart tsirkona dlya uran-svintsovykh izotopnykh issledovaniy. *Geokhimiya i rudoobrazovaniye*, 21, 164-167.

Bondarenko, S.M., Karly, Z.V., Stepanyuk, L.M., S'omka, V.O., Donskiy, M.O., S'omka, L.V. (2014). Zavallovskiy rudoproyav kaliyno-uranovoy formy: mineralogiya, geokhimiya, chasoobrazovaniye. *Geokhimiya ta rudoutvorenniya*, 34, 3-17.

Krough, T.E. (1973). A law contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 3, 485-494.

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

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

Shcherbak, M.P. Artemenko, G.V., Bartnitskiy, Ye.N., Verkhoglyad, V.M., Komaristyy, A.A., Lesnaya, I.M., Mitskevich, N.Yu., Ponomarenko, A.N., Skobelev, V.M., Shcherbak, D.N. (1989). Geokhronologicheskaya shkala dokembriya Ukrainского shchita. Kiyev: Nauk. dumka, 140 p.

Stepanyuk, L.M. (1999). Pobochnoye deystviye vyrazhennykh protsessov v porodakh bugskoy serii. Sredneye Pobuzh'ye. *Mineral. zhurnal*, 21, 5-6, 86-92.

Stepanyuk, L.M., Skobeleva, V.M., Dovbush, T.I., Bobrov, O.B., Merkushev, I.E. (2005). Chas vrozhdeniya granitov v porody buz'koy serii (na primere Khashchuato-Zavallivskoy struktury). *Sbornik nauchnykh prats' UkrDGR*, 2, 26-32.

Надійшла до редколегії 14.04.22

L. Stepaniuk, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,

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

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

34 Paladina Ave., Kyiv, Ukraine;

V. Zagnitko, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,

E-mail: zagnitkow@i.ua;

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

T. Dovbush, Researcher,

E-mail: tetyana.dovbush1@gmail.com;

N. Kovalenko, Junior Researcher,

E-mail: kovnat.igmr@gmail.com;

O. Zülzle, Cand. Sci.(Geol.), Researcher,

E-mail: olegzjults@gmail.com;

T. Yaskyevych, Cand. Sci. (Geol.), Researcher,

E-mail: albobrov@ukr.net;

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

34 Paladina Ave., Kyiv, Ukraine

## U-PB GEOCHRONOLOGY OF CRYSTALLINE ROCKS OF VILSHAN MINE (MIDDLE BUG, UKRAINIAN SHIELD)

*Geochronological studies of granitoids from the Vilshansky mine of Middle Pobuzhzhya were carried out. Zircons and monacites from plagiogneiss, plagiogranites and migmatites of the Bug complex were analyzed. As a result, it was established that the rock association, which consists of migmatites with numerous xenolites of biotite gneisses, plagiogneisses, occasionally graphite-containing gneisses, amphibolites and biotites (Khashchuvate-zavallivska suite of the Bug series) and intersected with the veins of aplite-pegmatoid granites, was formed as a result of a large-scale manifestation of graniteization processes, which began not later than 2.02 billion years ago and ended about 2.0 billion years ago. The age of metamorphic host rocks corresponds to the Archean values of uranium-lead dating.*

*Keywords: zircons, monacites, plagiogneisses, plagiogranites, migmatites, izotopian age, concordia.*

UDC 553.3/.4.078

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.07>

M. Mansurov, PhD (Geol.- Min.), Assoc. Prof.,  
E-mail: [mamoy\\_mansurov@mail.ru](mailto:mamoy_mansurov@mail.ru),  
Baku State University Department of Geology,  
23 Z.Khalilov Str., Baku, AZ 1148, Azerbaijan

## GEOCHEMICAL FEATURES OF COPPER PORPHYRY MINERALIZATION IN THE GOSHGARCHAYORE MAGMATIC SYSTEM (MUROVDAG ORE REGION, AZERBAIJAN PART OF THE LESSER CAUCASUS)

*(представлено членом редакційної колегії д-ром геол.-мінералог. наук, проф. В. М. Загітком)*

The geochemical features of intrusive rocks and the surrounding rocks associated with porphyry copper mineralization in the Goshgarchay magmatic system were studied. Major factors of concentration of copper and copper-porphyritic mineralization in rocks of gabbro-diorite-granodiorite formation has been revealed. It has been established that the structure of this ore region was formed as a result of successive alteration of some deformation stages accompanied by development of fractures in intrusive massive, by dike intrusions, locks displacements along faults and the fractures composed of various mineral associations.

Main ore components were defined and relations hips among elements were considered. Geochemical associations allowing the localization of the development area of mineralization have been analyzed in various formation stages of porphyry copper system according to the results of cluster analysis. In this study, Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, Mn, Ti, Cr, V, and Sr both in the surrounding rocks and in ore-bearing intrusive rocks were considered as stable elements. This group of elements can be regarded as indicator elements in porphyry copper.

The results of the cluster analysis show that the elements which are less characteristic for hydrothermal solutions (Mn, Ti, Cr, V, Sr) keep their freedom in all wallrocks and the existence of their grouping is probably associated with their transportation process from silicate rocks with surrounding basic-average content. The elements such as Cu, Mo, Ag, Pb and Zn which form free group are connected with the generation from the magmatic source in the course of crystallization differentiation process and exposure of rocks to the hydrothermal activity which is considered the source of these elements. The identification of reasons of the association of V with Cu and Zn and Pb with Fe group elements in the intrusive facies rocks is characterized with its uncertainty. The analysis of the schedule made according to the results of Cu and basic ore components (Mo, Ag, As, Bi, Gd, Co, Cr, Se, Ge, Li, Nb and etc.) in the ores of Goshgarchay deposit show their dependence on one another equally. The amount of Cu in the ores have Ag, As, Bi, Cd, Ce, Ge, Sr, Mo, Sb, Th and Ti positive correlation relationship, but it has negative correlation relationship with Co, Cr, Cs, La, Li, Pb, Rb, Ni, Nb and Zn. Direct dependence is observed for ore mass between concentrations of Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Se, Te and other elements in the Goshgarchay porphyry copper deposit. Three various mineral associations differing from one another participate in stock work type copper-porphyry mineralization: 1) primary sulfide minerals; 2) oxidized ores; 3) primary sulfide minerals significantly enriched with products of hydrothermal ore carrying solutions.

**Keywords:** copper-porphyry mineralization, Goshgarchay, geochemistry, main ore components, pointed dependence, correlation links.

**Introduction.** Porphyry copper deposits form in island-arcs and along the edges of the continent. They are also associated with post collisional volcanism through the frontal part of island. Arcs are compatible to the first type granitoid massif and they are referred to series of magnetite. They compositionally are diorite massifs and subvolcanic mass of shoshonite in the back part of the arc (Sillitoe, 2010). The majority of the known porphyry copper deposits are the Mesozoic and Cenozoic in age. The majority of them are conformed to the system of regional decompositions creating conditions to local expansions and providing free movements of fluids. Porphyry copper deposits can be classified into Cu-Mo, Cu-Mo-Au, and Cu-Au deposits (Titli and Bin, 1984; Sillitoe, 2010). Porphyry copper deposits are a result of complicated interactions of a number of processes and they are characterized by the following existing signs (Burgeret al., 2008): 1) the presence of copper-rich magmas containing stockwork structure conforming to the complicated veinlet system; 2) a genetic relationship of hydrothermal alteration zones and mineralization with magmatic basin at a depth of 1–4 km; 3) direct manifestation of intrusive complexes has caused the formation of porphyry deposits and predominance of vertical stocks and dyke systems; and 4) large-scale hydrothermal alteration zones. Here chlorite-sericite hydrothermal zones derivative quartzite and marginal propylitic zones cover internal calciummetasomatites (Sillitoe, 2010; Berzina and Borisenko, 2017).

Great mass of copper ores can be extracted from porphyry deposits worldwide. These deposits are considered main sources of Mo, Au, Ag, Re, Te, and platinum group elements. Porphyry Cu and Cu-Mo deposits associated with volcano-plutonic complexes are developed

in most metallogenic zones of Azerbaijanian part of the Lesser Caucasus. Copper mineralization associated with plutonic granitoid massif of the Murovdag ore-bearing region is considered more promising. Several porphyry Cu deposits are located here (Goshgarchay, Goshgardag and etc.), in which reserves of copper can be included in a group of large deposits (Baba-zadeh et al., 1990; Ramazanov, 1993).

The Goshgarchay ore district is considered promising deposit and same-name-cognominal copper-porphyry deposit which has been properly studied within the frames of ore-magmatic system, where exploration work has been conducted. Geochemical features of copper-porphyry mineralization within ore-magmatic system have been investigated in this article.

The main purpose of the article is to study geochemical features of copper-porphyry mineralization by analyzing petrographic-petrological features of intrusive and surrounding rocks in Goshgarchay ore-magmatic system. The definition features of major elements and basic ore components have been investigated, their genetic and geochemical features have been studied, the relations between pairs of the element have been defined by the correlation analysis.

**Analysis of previous studies.** Large sizes and large reserves, as well as the possibility of using rational methods of metal extraction predetermined an increased interest in porphyry copper deposits, which are currently the main raw material base for Cu, Mo. Deposits often contain a number of associated components in industrial quantities among which Au, Ag, Bi, Te, Re and Se play a leading role. Their accounting significantly increases the total value of ores (Babazadeh et al., 1990; Popov, 1977). They are accompanied by numerous polymetallic, gold-silver, pyrite

© Mansurov M., 2022

satellite deposits and placers. The study of porphyry copper mineralization of the Murovdag ore region began during the period of intensive exploration of porphyry deposits in the Lesser Caucasus (*Baba-zadeh et al., 1990; Ramazanov, 1993*). Endogenous deposits of the Lesser Caucasus are represented by a wide range of genetic and formational types. At present, there is sufficiently substantiated opinion that these deposits form a complex polygenic group with pronounced features of polycyclic development, a variety of tectonic conditions and forms of magmatism manifestations (*Babazadeh et al., 1990; Popov, 1977; Titley and Bean, 1984; Sillitoe, 1996; Pavlova and Sakhnovsky, 1988*). A significant amount of the research as well as their wide geography is devoted to the problems of endogenous ore deposits of the Murovdag ore region. Deposits of different age and different formations of various ores are concentrated there. The features of these deposits are highlighted in monographic summaries, numerous publications (*Baba-zadeh et al., 1990; Ramazanov, 1993; Mansurov, 2013*), such as monographs by Baba-zadeh and others (2005), Baba-zadeh and others (1990). They include articles on geology, mineralogy, geochemistry, formation parameters, isotopic studies of objects of the Goshgarchay ore field (*Mansurov, 2014*). In the work on the Porphyry Copper Formation of Azerbaijan, V.G. Ramazanov (1993) touched upon a number of geological and geochemical features of the Goshgarchay porphyry copper deposit, its connection with magmatism and other issues. Later, we conducted research in this area and published a number of articles in various journals (*Baba-zadeh et al., 1990; Ramazanov, 1993; Mansurov, 2013; Imamverdiyev et al., 2018*). At the same time, studies devoted to the compilation of geological-genetic models of porphyry copper and polymetallic deposits were incomplete. This is explained by their rather large diversity, the idea of their formational affiliation, connection with magmatism and peculiarities of ore components and impurity elements distribution (*Popov, 1977; Abdullayev et al., 1988*). The results, presented in the works, indicate the exceptional relevance of this issue. When processing the materials, the author used both classical literature (Mineral-raw resources of Azerbaijan, 2005; *Geology of Azerbaijan, Magmatism, 2003; Ramazanov, 1993*) and modern publications (*Baba-zadeh et al., 1990; Mansurov, 2013, 2021; Imamverdiyev et al., 2018*). The distribution features of the main ore components in the host rocks and ores of the Goshgarchay deposit have not been sufficiently studied in these works. The value of porphyry copper deposits primarily lies in the fact that they have been discovered in geologically well-studied areas. The ores, with a relatively low content of the main (Cu, Mo) and associated components (Au, Ag, Bi, Re, Se, Te), in them, are characterized by more areal distribution and significant reserves. These features of porphyry copper deposits make them potentially promising. Therefore, a comprehensive geological study of them, including the distribution features of the main ore components of the Goshgarchay deposit, is very relevant. Our goal here was to study these distribution features of ore-generating components by means of mathematical – statistical calculation of analytical data. The obtained results can form the basis for geochemical criteria for direct prospecting and forecasting of hidden porphyry copper ores.

**Factual materials and research methods.** The basis for the factual material was a collection of samples (about 150 pieces) taken inside and around the stockwork with vein – disseminated mineralization and on its flank to a depth of more than 500 m from the surface. Data from geochemical

sampling of ore – host rocks and ores in mine workings and core samples from boreholes were used for this along sections directed perpendicular to the strike of ore – concentrating structures. The collection includes samples taken from gabbroids, quartz diorites, quartz veins with galena – sphalerite – chalcopyrite mineralization. Atomic absorption analysis on a Perkin Elmer device allowed to quantitatively determine such elements as Cu, Mo, Au, Ag, Se, Te, Cr, Ni, Co, Pb, Zn, Sr, Cd, As, Bi. The geochemical data for the wells were processed in the STATISTICA program, using the factor analysis of the main components. Methods of semi – quantitative spectral analysis were applied to study the contents of chemical elements in the host rocks and porphyry copper ores. The main ore samples were taken from the vein – disseminated stockwork type ores. The rock samples were examined by inductively coupled plasma mass spectroscopy (ISP-MS). Silicate chemical analysis was carried out in the laboratory of Izmir University, Turkey. The rock samples were examined by inductively coupled plasma mass spectroscopy (ISP-MS). Analytical studies were performed at the USGS Analytical Laboratory of the United States Geological Survey (Denver).

**Geological setting and deposit geology.** Peculiarities of geological aspects of Goshgarchay copper-porphyry deposits have properly been described in earlier published works (*Abdullayev et al., 1988; Baba-zadeh et al., 1990; Geology of Azerbaijan. Magmatism, 2001; Geology of Azerbaijan. Tectonics, 2005; Mansurov, 2014*).

Murovdag ore district including Goshgarchay deposit, being a component of Lok-Agdam peninsula arc (Fig. 1) occupies NW uplifted part of Murovdag anticlinorium of asymmetrical structure consisting of the rocks of Lower Bajocian volcanogenic layer in the core and Upper Bajocian and Bathonian strata of basalt-andesite-rhyolite successively differentiated formation in the flanks. The ore district consisting of intrusives is Goshgarchay complex of granitoid intrusions (Goshgardag, Ojagdag, Balaja Goshgardag) and their dyke formations which break through the thick complex of effusive pyroclastic formation impacting contact action on them. Intrusive complexes with copper-porphyry mineralization according to geological-petrological features belong to gabbro-diorite-graniodiorite formation of Later Yurassic-earlier Cretaceous ages (*Abdullayev et al., 1988; Geology of Azerbaijan. Magmatism, 2001*).

Copper-porphyry mineralization cover Goshgarchay, Goshgardag, Kyzylarkh, Kechaldag, Eric-Manuk and other deposits and ore manifestations in the ore district where it's located in tight special and genetical relations with Murovdag granitoid massif (*Abdullayev et al., 1988; Babazadeh et al., 1990*). According to geological setting and special distribution, intrusive formations of Murovdag group are divided into Goshgardag and Gyzyllarkh groups (*Geology of Azerbaijan. Magmatism, 2001*).

Goshgarchay ore-magmatic system is located in the uplift part of the south-west of Murovdag anticlinorium with (of) asymmetrical structure which is a main component part of Lok-Agdam islands-arc. The core of the anticlinorium is represented by lower Bajocian volcanogenic layer, but its wings are represented by consistently differentiated basalt-andesite-rhyolite formation layers of Bajocian and Bathonian ages. Fault structures of different directions with overthrust features developed widely within ore-magmatic system, giving it block structure. Fault structures of the north-west and near-meridional direction prevail and intrusive massives occur in their intersection junction (*Geology of Azerbaijan. Tectonics, 2005; Geology of Azerbaijan. Magmatism, 2001*).

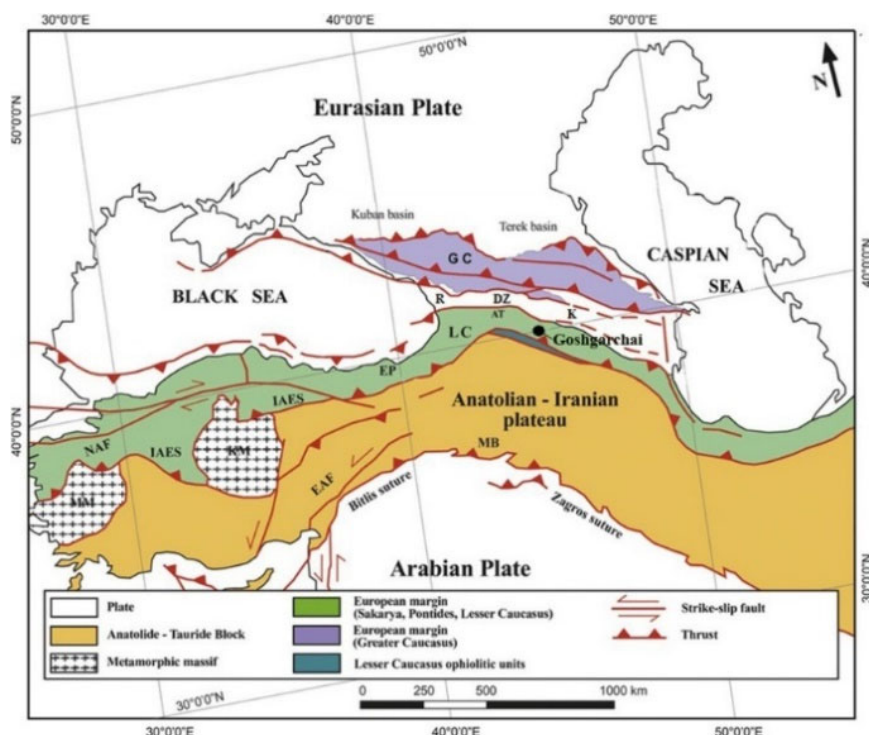


Fig. 1. Tectonic map of the Arabia-Eurasia collision zone. Location of the Goshgarchay deposit is shown by a filled circle (modified from Sosson et al., 2010)

Abbreviations: GC – Greater Caucasus; LC – Lesser Caucasus; AT – Achara-Trialeti; R – Rioni; Dz – Dzirula; K – Kura; MB – Mus Basin; EP – Eastern Pontides; KM – Kirsehir Massif; EAF – Eastern Anatolian Fault; NAF – North Anatolian Fault; IAES – Izmir-Ankara-Erzincan Suture; MM – Menderes Massif

Copper-porphyry mineralization surrounding Goshgarchay, Goshgardag, Gyzył-arkhach, Kechaldag and other deposits and manifestations forms an association with spatially-genetically same-name granitoid intrusive within Murovdag region. The intrusives comprising ore-magmatic system consist of Goshgarchay complex granitoid intrusives (Goshgardag, Ojagdag, Small Goshgardag) and their dyke systems forming effusive-pyroclastic complex and making contact-thermal relationship with them. Only near meridional Small Goshgardag anticlinal zone located in the southern part of Murovdag anticlinorium takes part in the structure of ore-magmatic system. Anticlinal is composed of volcanogenic-pyroclastic formations represented by steep dip layer (50–80°) of Lower Bajocian (*Geology of Azerbaijan. Tectonics, 2005; Geology of Azerbaijan. Magmatism, 2001; Baba-zadeh et al., 1990*).

The fault structures of different directions which form the block structure of ore-magmatic system in the spatial definition of copper-porphyry and copper-polymetallic mineralization are of significant importance in Murovdag ore district. On the one part they are conditioned with dominating fault structures of north-west direction (Goshgarchay, Alkhanjalli, Chanakhchi), on the other part – with the combination of fault structures of latitudinal (Khoshbulag) and submeridional (Bala Goshgarchay) directions. Larger tectonic rupturings are considered Goshgarchay, Alkhanjalli and Chanakhchi faults of north-west directions (280–330°) lying under 45–85° angle towards the north-east (*Geology of Azerbaijan. Tectonics, 2005; Baba-zadeh et al., 1990*).

Out of latitudinal faults, Goygol-Khoshbulag latitudinal curving fault which is supposed to pass through the central part of Goshgarchay ore-magmatic system is considered to be much larger.

The fault structures of small order are considered mainly latitudinal, sublatitudinal (25–300°), meridional and near

meridional (10–40°) directions (*Geology of Azerbaijan. Tectonics, 2005*). Of them, faults of small Goshgarchay near meridional direction arouse great interest. Extending along the same-name river, this fault cuts the ore-magmatic system from the south-west to the north-east and then it is followed up to Ojagdag range. Within Goshgarchay ore-magmatic system, directly second, third and fault systems of higher order are of great importance in comparison with basic ore controlling structures (small faults, intersection areas with surface contact of their different phase intrusives, brecciation zone) for the localization of copper-porphyry mineralization (*Baba-zadeh et al., 1990; Ramazanov, 1993*). Fracture systems in endo and exo contact zones of intrusives define the morphology and measure of ore stockwork. Such fracture systems develop mainly along the contacts of stocks and depend on the form, occurrence depth and structural features of intrusives.

Above-mentioned petrographical component of intrusive massif differs with significant complexity which is related with intrusive activity of multiphase. So, the intrusions of Goshgardag district is mainly presented with gabbro, gabbro-norite, insignificant gabbro-pyroxene consisting of gabbroid phase of intrusions and quartz diorites, granodiorites, granitoid phase formed by sharp intrusive contact with gabbroids (*Geology of Azerbaijan. Magmatism, 2001*).

Gabbro-norites are medium-grained, almost black rocks consisting of plagioclase, pyroxenes, small amount of biotite, protobase, olivine, as well as secondary and accessory minerals.

The mineral composition of gabbroids, along with the main plagioclase, includes pyroxenes and hornblende, some varieties of these rocks may also contain small percentage of quartz (up to 3–4 %). Plagioclase (37–69 %) ranges in composition from labradorite to bitovnite (54–83 %). According to the composition and morphology of

crystals, the rocks consist of two generations of plagioclase: plagioclase feldspar of the early generation has more basic composition, then the second generation one, which is represented mainly by labradorite. Mostly the plagioclases are characterized by intermediate Al-Si ordering state. Pyroxenes (18–25 %) are represented by hypersthene, less common enstatite, augite, and even less common diopside. They are, to one degree or another, biotitized or chloritized along cracks or along the edges; replacement of the plagioclase by epidote is quite frequent. Compositions of the pyroxenes are  $W_{45-52}$ ,  $En_{28-42}$ ,  $Fs_{3-26}$ .

Accessory minerals are presented by magnetite (4,6 %), ilmenite (up to 0,4 %), apatite (up to 0,29 %), zirconium (up to 207 g/t). The minerals of ore and rare elements and volatile components occur sporadically in small quantities (*Geology of Azerbaijan. Magmatism, 2001*).

The stratified bodies of Gyzyllarkh area are presented by quartz diorites, gabbro-diorites and insignificant amount of diorites, gabbro banatites. Getting closer to the endo contact the rocks acquire more basic character. Gabbro-norites are medium-grained, almost black rocks consisting of plagioclase, pyroxines, small amount of biotites, protobase, olivine, as well as secondary biotites and accessory minerals. Quartz diorites are finely grained, full crystalline rocks, represented mainly by plagioclases, hornblende, biotite, quartz, sometimes mixed with pyroxene, potassium feldspar and albite (*Abdullayev et al., 1988; Geology of Azerbaijan. Magmatism, 2001*).

Plagioclases are represented by andesine and often exhibit typical zoning pattern: a core has a composition of labradorite. Mineral alteration usually affects the core of plagioclases with a high anorthite content. The plagioclases can be classified according to their Al-Si degree of ordering: high, intermediate, low. In terms of chemical composition, plagioclases of various intrusions do not differ significantly (*Abdullayev et al., 1988; Geology of Azerbaijan, 2001*).

Potassium-sodium feldspar often occurs in the rocks in small amounts (1–5 %) as xenomorphic grains with characteristic opacity. Amphibole is represented mainly by hornblende, however hastingsite, paragasite, tremolite are also present in the rock.

Magnetite (up to 2 %), ilmenite (up to 0,15 %), apatite (1256 g/t), zircon (190 g/t), sphene (65 g/t) dominate the accessory mineral assemblage. Epidote, orthite, tourmaline, monazite, molybdenite, and a number of others in small amounts were also observed.

The rocks on classical diagram  $(Na_2O + K_2O) - SiO_2$  occupy the field of the rocks with normal alkalinity which allows to take them to the normal petrochemical row (Fig. 2). Described classified diagrams of rocks are mainly concentrated in gabbroid fields. It is seen from diagrams that they are compactly located. Other petrographic types of rocks or differentiates are located in the field of quartz diorites and here according to normative mineralogical composition the content of albites increases in compliance with it, basic plagioclase reduces.

The chemical compositions of the rocks of these massifs are given in table 1, according to which graphic images were compiled reflecting particular petrochemical features of the rocks.

The structure of the ore district was formed as a result of succession of several stages of deformation accompanied by fracture formation in the intrusive massif, by intrusion dyke, by block move on the tectonical fault and by cavity filling of fractures with different mineral associations. Sublateral or common Caucasian orientation of disruption become ore conduit, but faults along NE strike feathering Goshgarchay faults by its side wall become ore localization structure which is explained by: 1) the localization of ore zone in the underlie; 2) by similar directions of dipping of ore zone and faults in a steeper angle of the latter; 3) localization of ore zone in small systems of fractures and disruptions; 4) confinedness to basic faults of subvolcanic bodies and dykes, zone of intensive hydrothermal change of rocks and impregnated sulphide mineralization (*Geology of Azerbaijan, 2005*).

Goshgarchay deposit is located in the merge of Boyuk Goshgarchay district and Balaja Goshgarchay at 10–12 km towards the south-west from Khoshbulag village. It consists of basic Bajocian volcanogenic formations broken by granitoid Goshgarchay massif (*Geology of Azerbaijan. Magmatism, 2001*).

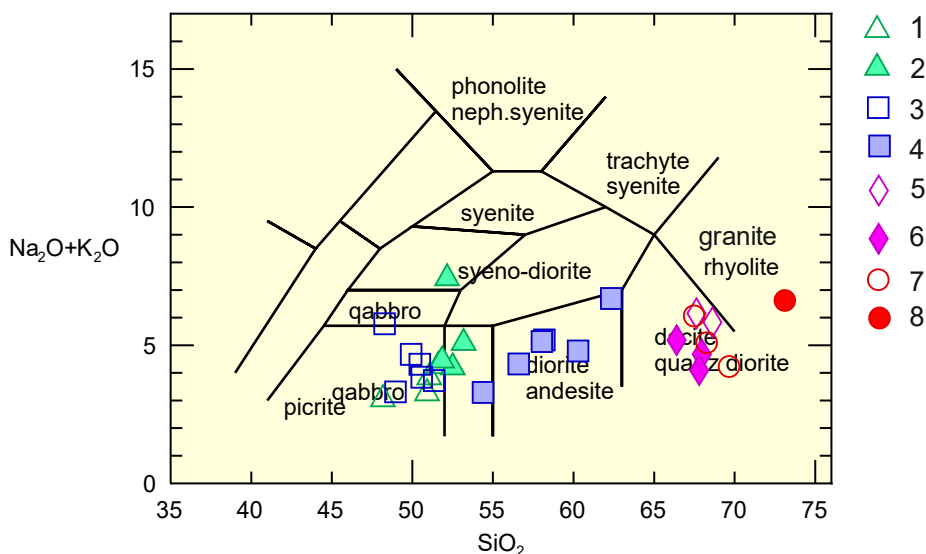


Fig. 2. The location of rocks of magmatic complex in classified diagram  $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$  Murovdag anticlinorium: 1 – gabbro norites; 2 – gabbroids; 3 – gabbro; 4 – quartz diorites; 5 – graniodiorites; 6 – dacites; 7 – rhyodacites; 8 – rhyolites

Table 1

The chemical composition of intrusive and effusive complexes of the Murovdag anticlinorium

|                                | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 48.17 | 50.91 | 51.05 | 51.6  | 53.18 | 52.51 | 52.16 | 51.85 | 51.36 | 50.58 | 50.47 | 49.93 | 48.95 | 48.28 | 54.39 | 58.19 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.54  | 0.5   | 0.46  | 1.03  | 0.37  | 1.47  | 0.45  | 1.69  | 0.28  | 0.63  | 0.3   | 0.5   | 0.29  | 0.4   | 0.65  | 0.65  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19.62 | 17.77 | 19.1  | 16.88 | 16.49 | 17.88 | 21.87 | 17.46 | 16.56 | 12.38 | 18.16 | 12.99 | 16.67 | 21.79 | 14.38 | 18.23 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.25 | 3.8   | 3.45  | 3.76  | 5.75  | 2.86  | 3.15  | 4.46  | 7.19  | 10.5  | 5.06  | 7.51  | 9.19  | 5.39  | 6.76  | 2.24  |
| FeO                            | 3.05  | 5.5   | 5.01  | 4.43  | 5.08  | 5.06  | 4.85  | 4.82  | 6.22  | 7.42  | 4.62  | 8.89  | 4.36  | 3.61  | 5.05  | 2.64  |
| MnO                            | 0.12  | 0.1   | 0.13  | 0.08  | 0.09  | 0.04  | 0     | 0.12  | 0.11  | 0.14  | 0.05  | 0.13  | 0.1   | 0.08  | 0.05  | 0.1   |
| MgO                            | 3.42  | 6.02  | 5.7   | 5.4   | 4.2   | 3.92  | 3.44  | 5.01  | 2.81  | 3.97  | 5.41  | 3.35  | 5.05  | 4.01  | 5.04  | 3.68  |
| CaO                            | 12.13 | 10    | 9.22  | 10.78 | 9.64  | 9.49  | 5.4   | 8.03  | 10.32 | 9.62  | 7.14  | 10.54 | 10.65 | 6.12  | 6.96  | 7.14  |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.26  | 2.55  | 3.43  | 3.64  | 4.52  | 3.44  | 4.54  | 3.73  | 3.35  | 3.11  | 3.42  | 4.07  | 2.72  | 3.89  | 2.29  | 3.97  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.78  | 0.7   | 0.4   | 0.6   | 0.56  | 0.75  | 2.88  | 0.71  | 0.37  | 0.73  | 0.89  | 0.6   | 0.59  | 1.89  | 1     | 1.22  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0     | 0     | 0.04  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| I                              | 0.43  | 2.07  | 1.06  | 2.11  | 0.61  | 2.36  | 1.65  | 2.04  | 2.21  | 1.74  | 4.01  | 2.05  | 1.28  | 4.27  | 3.1   | 1.31  |
| Σ                              | 100.8 | 99.92 | 99.05 | 100.3 | 100.5 | 99.78 | 100.4 | 99.92 | 100.8 | 100.8 | 99.53 | 100.6 | 99.85 | 99.73 | 99.67 | 99.37 |

|                                | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    | 29    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 56.6  | 58.04 | 60.29 | 62.34 | 68.62 | 67.63 | 67.96 | 67.8  | 66.4  | 69.65 | 68.26 | 67.48 | 73.11 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.47  | 0.1   | 0.42  | 0.24  | 0.2   | 0.55  | 0.26  | 0.25  | 0.28  | 0.38  | 0.38  | 0.38  | 0.38  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.51 | 15    | 15.62 | 13.84 | 16.33 | 15.37 | 15.11 | 16.81 | 16.99 | 14.5  | 14.64 | 14.9  | 13.15 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.5   | 5.67  | 3.36  | 4.41  | 1.95  | 2.02  | 2.29  | 2.27  | 2.22  | 1.74  | 1.8   | 1.69  | 2.16  |
| FeO                            | 4.95  | 4.09  | 3.72  | 2.72  | 2.53  | 2.57  | 1.46  | 1.99  | 1.76  | 1.55  | 1.29  | 1.87  | 0.97  |
| MnO                            | 0.14  | 0     | 0.05  | 0     | 0.1   | 0.1   | 0.06  | 0.01  | 0.08  | 0.08  | 0.05  | 0.06  | 0.05  |
| MgO                            | 4.7   | 2.3   | 2.8   | 3.1   | 0     | 1.05  | 1.76  | 1.79  | 2.42  | 1.72  | 1.88  | 2.69  | 1.65  |
| CaO                            | 7.1   | 6.94  | 5.36  | 8.66  | 4     | 3.53  | 5.15  | 3.6   | 4.28  | 5.1   | 4.82  | 4.21  | 0.81  |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.2   | 3.3   | 3.47  | 6.2   | 3.65  | 3.66  | 3.29  | 2.61  | 3.45  | 2.97  | 3.45  | 3.37  | 6.02  |
| K <sub>2</sub> O               | 1.12  | 1.83  | 1.32  | 0.49  | 2.18  | 2.49  | 1.38  | 1.48  | 1.73  | 1.26  | 1.64  | 2.69  | 0.6   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.09  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.07  | 0.08  | 0.07  | 0.07  | 0.08  | 0.08  | 0.08  |
| I                              | 2.2   | 3.03  | 2.3   | 0.87  | 0.55  | 0.75  | 0.99  | 1.04  | 0.94  | 0.71  | 0.98  | 0.89  | 0.69  |
| Σ                              | 99.58 | 100.3 | 98.71 | 102.9 | 100.1 | 99.72 | 99.78 | 99.73 | 100.6 | 99.73 | 99.27 | 100.3 | 99.67 |

Note. 1-4 – gabbro-norites; 5-8 – gabbroids; 9-14 – normal gabbro; 15-20 – quartz diorites; 21-25 – dacites; 26-29 – rhyodacites.

**Structural-morphological features and mineral composition of the deposits.** Veinlet impregnated stock work are predominantly develop in the deposit. The vein type of mineralization is of secondary significance and it is confined to the crush zone and hydrothermal changes zone among diabase porphyrites. The mentioned type of mineralization is presented by quartz and carbonate veins and veinlets, impregnated by pyrite, chalcopryrite and molybdenite.

Stockwork body composing the central part of Goshgarchay deposit is confined to apical and peripheral part of the cognominal (the same-name) intrusive, to be more accurate, to its endo and exo contact zone and in sublateral direction occupies approximately 0,8 km<sup>2</sup> area.

Copper contains 0,4 % at a cut-off grade in the margins of stockwork on the surface and ten ore columns were selected. The interpretation of the results of analysis of kern materials allows considering these enriched areas as merging in the depth, in a single ore body forming stockwork with complex morphology. The surface of stockwork body is particularly complicated. The fractures of north-western, submeridional and sublateral directions filled with non-ore and quartz-sulphide substance develop in the stockwork. Veins presented by quartz-carbonate fillings have sublateral strike. They are confined to the crush zone with the thickness of 30–60 m among diabase porphyrites.

More intensive ore mineralization is observed in the central part of stockwork which gradually flattens with distance from the centre towards selvage. Outlines of ore body are winding and orthomorphous in the relation to the morphology of ore generating porphyry intrusive. In conclusion, according to the above-mentioned facts, ore body analogically to intrusion has south-western decline.

Copper is basic useful component. Its content is unsteady in the margins of stockwork body and fluctuates (hesitates) in a wide range from 0,2 to 2,5% comprising in average 0,41%. Among series of ore minerals having major influence on the

significance of deposits, molybdenum and noble metals should be mentioned. In some intervals the average content of gold comprises 2,0 g/t and more. Along with gold, increased content of silver was also defined where its significance reaches 30-40 g/t which can positively impact on the value of deposit. Basing on structural-morphological features, we can say that ore mineralization is stockwork veinlet-impregnated type in the deposit of Goshgarchay where impregnation prevails over veinlets and veins.

In the deposits the mineral composition of the ore doesn't differ with great variety and it is characterized by small amounts of ore minerals, their tight intergrowth. As a result of studies of the polished thin sections, the following ore minerals were defined: pyrite, chalcopryrite, sphalerite, arsenopyrite, melnicovite-pyrite marcasite, fahl ore, cobalt-pyrite, enargite, bismuthine, bornite, ilmenite, hematite, chromespinelide, chalcosine, covelline, malachite, azurite, limonite and etc. Among them basic ore minerals of the deposit are chalcopryrite, bornite, pyrite, molybdenite, tenantite, chalcosine, enargite, native copper, gold and rutile. Veined minerals are presented by quartz, calcite, epidote, caolinite, sericite, chlorite, biotite, muscovite and etc (Baba-zadeh et al., 1990; Mansurov, 2014).

**Results of the research.** The samples of rocks were explored by the method of mass-spectroscopy with inductive-connected plasma (ISP-MS). Analytical researches were carried out in the analytical labs USGS Geological service of the USA (Denver).

Petrological features of the magmatic rocks of ore district were studied by up-to-date methods. Silicate chemical analysis were carried out in the labs of the faculty of Geology of the University of Izmir, Turkey. Atom-absorbion analysis in the devices (appliances) of the company Perkin Elmer allowed to define series of elements quantitatively (Cu, Mo, Pb, Zn, Ni, Co, Sr, Ag, Cr and etc). The study of

microelements were conducted in Switzerland in the devices XRF at the University of Lausanne.

Genetic and geochemical features of intrusive rocks and the surrounding rocks associated with mineralization in the Goshgarchay magmatic system were determined by mineralogical and geochemical analyses. The number of testing points within ore-magmatic system has been nearly 1000. Their distribution has been conducted equally within the area. Fundamental vents have been tested both on natural openings and exploration mountain drillings (ditches, wells, pit holes). All testing points have been accompanied

by geological and petrographic descriptions. Experiments have been applied on the elements, such as Ag, Au, As, Bi, Ca, Cd, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Se, Sr, Ti, and V. Primary materials on the results of mineral analysis and the surrounding rocks stand, on the basis of the solution of the raised questions. Statistical parameters of the definition of elements of ore origin on the ore-magmatic system are given in Tables 2 and 3. The development of statistical results of geochemical information through the obtained results was carried out according to the programs of "Statistics" and "MINITAB 16".

Table 2

Statistical parameters of the definition of elements of ore origin on the surrounding rocks of the Goshgarchay magmatic system

| №    | Ti   | Al    | Fe    | Mn   | Mg     | Ca    | Na    | K     | P    |
|------|------|-------|-------|------|--------|-------|-------|-------|------|
| G-72 | 667  | 22100 | 73200 | 1340 | 174000 | 4.5   | 493   | 772   | 78.2 |
| G-73 | 689  | 22000 | 76600 | 1350 | 183000 | 4.5   | 502   | 698   | 75.1 |
| G-74 | 891  | 27600 | 72200 | 1220 | 161000 | 36600 | 648   | 649   | 95.9 |
| G-75 | 1230 | 41300 | 63000 | 1260 | 114000 | 60900 | 10400 | 778   | 115  |
| G-76 | 886  | 28200 | 70100 | 1210 | 152000 | 52700 | 738   | 316   | 78   |
| G-77 | 949  | 29600 | 73300 | 1280 | 159000 | 43200 | 721   | 504   | 83.8 |
| G-78 | 770  | 24400 | 74400 | 1260 | 172000 | 40500 | 732   | 797   | 54.4 |
| G-79 | 890  | 30600 | 72500 | 1260 | 155000 | 50600 | 576   | 296   | 81.2 |
| G-80 | 6750 | 89000 | 39800 | 588  | 20900  | 23300 | 49400 | 14400 | 1310 |
| G-82 | 2520 | 64900 | 52900 | 744  | 18200  | 56800 | 18800 | 384   | 324  |
| G-84 | 1500 | 85500 | 33700 | 186  | 22600  | 24200 | 21600 | 1630  | 174  |
| G-85 | 819  | 88400 | 26500 | 198  | 18300  | 26000 | 31100 | 1790  | 21.5 |
| G-86 | 1090 | 75400 | 36700 | 181  | 19700  | 24000 | 17200 | 1220  | 340  |
| G-87 | 1180 | 89000 | 30300 | 206  | 20200  | 25800 | 21800 | 1700  | 156  |

Table 3

Statistical parameters

| №    | Pb   | Zn   | Cu    | Bi   | Sb   | As   | Mo   | Cr   | Ni   | Co   | V    | Sc    |
|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| G-72 | 11.1 | 83.7 | 105   | 0.12 | 0.59 | 1.9  | 0.9  | 1260 | 2.2  | 0.61 | 127  | <0.04 |
| G-73 | 5.52 | 1120 | 248   | 0.06 | 0.42 | 1.4  | 0.83 | 1340 | 20.8 | 21   | 120  | 0.8   |
| G-74 | 3.68 | 130  | 149   | 0.07 | 0.45 | 2    | 0.77 | 1530 | 534  | 84.9 | 151  | 27    |
| G-75 | 51.8 | 173  | 88.4  | 0.13 | 0.95 | 2    | 2.2  | 1520 | 321  | 59.2 | 202  | 33.3  |
| G-76 | 3.64 | 77.2 | 104   | 0.06 | 0.21 | 4.1  | 0.45 | 1780 | 519  | 85.8 | 161  | 27.2  |
| G-77 | 3.88 | 124  | 66.2  | 0.06 | 0.2  | <1   | 0.69 | 2210 | 539  | 88.7 | 156  | 27.8  |
| G-78 | 68.1 | 636  | 334   | 0.1  | 0.88 | 4.6  | 1.3  | 2260 | 597  | 95.2 | 159  | 27.1  |
| G-79 | 3.08 | 68.8 | 116   | 0.06 | 0.26 | 2.2  | 0.67 | 2360 | 492  | 83.7 | 196  | 29.4  |
| G-80 | 13   | 90   | 214   | 0.14 | 1.1  | 5.6  | 2.1  | 261  | 17.9 | 17.4 | 102  | 10.8  |
| G-82 | 7.91 | 60.1 | 49.6  | 0.06 | 0.22 | 4.9  | 1    | 203  | 26.8 | 20.2 | 323  | 23.6  |
| G-84 | 6.71 | 106  | 15000 | 0.88 | 1    | 5.9  | 4.6  | 719  | 34.9 | 9.5  | 180  | 25.4  |
| G-85 | 9.5  | 49.6 | 10900 | 0.44 | 2.1  | 12.6 | 4.5  | 738  | 34.8 | 8.4  | 123  | 34.6  |
| G-86 | 6.93 | 79.3 | 20300 | 0.32 | 1.2  | 7.5  | 4.2  | 251  | 46.4 | 13.2 | 158  | 27.2  |
| G-87 | 6.78 | 35.3 | 1350  | 0.08 | 0.52 | 1.3  | 7.2  | 421  | 15   | 10   | 92.2 | 12.4  |

Notes. G-72-gabbro; G-73-gabbro; G-74-gabbro; G-79-gabbro; G-80-diorite; G-82-basalt; G-75-andesite; G-76-andesite; G-77-andesite; G-78-secondary quartzite; G-84-secondary quartzite; G-85-copper-porphyry ore; G-86-87- ore-bearing secondary quartzite.

*The geochemical features of the surrounding rocks.* Elements, such as Ag, Al, As, Ba, Bi, Ca, Cd, Ce, Cr, Cu, F, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Se, Sr, Ti, and V were revealed in the Goshgarchay magmatic system and also in the surrounding rocks by spectral analysis. All were not regarded in statistic processing, because their contents were changeable. Elements that are almost stable both in the ores and in the surrounding rocks were included. Among the aforementioned elements, Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, Mn, Ti, Cr, V, and Sr are considered. There is a positive correlation among the trace elements Ag, As, Ba, Bi, Ca, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn, Mo, Co, Ti, and Cr in the surrounding rocks. Geochemical analyses indicate that contents of elements in the ores are slightly different from those in the surrounding rocks. According to it, we can note that all ore surrounding rocks are participants of ore generating process and in this case, carrier source of ore mineralization is considered later porphyry intrusives (*Baba-zadeh et al., 1990; Titley and Bean, 1984*).

As shown in Fig. 3, elements in the surrounding rocks of the Goshgarchay magmatic system were divided into two clusters. Cluster I was also categorized into three groups. They are as follows: group I: Ag and Cu; group II: Bi, Cd, and Pb; and group III: Cr and Mo. Cluster II was categorized into four groups. They are as follows: group I: Al, Ca, and Mn; group II: Mg, V, Sc, and Ti; group III: Na, Sr, Ce, Ni, Te, Zn, As, and P; and group IV: Ba, K, and S.

As shown on dendrogram of cluster analysis in Fig. 6, a series of elements in the surrounding rocks of the Goshgarchay porphyry deposit were considered as stable elements. They are Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, Mn, Ti, Cr, V, and Sr. They can be considered as indicator elements in porphyry deposits (*Baba-zadeh et al., 1990*). Results of cluster analysis indicate that elements that are less characteristic of hydrothermal fluids showed no dependency in the surrounding rocks. They include Mn, Ti, Cr, V, and Sr. The availability of their grouping is associated with transportation process from surrounding silicate rocks with

fundamental average content. The elements, such as Cu, Mo, Ag, Pb, and Zn are genetically associated with amagmatic source and are concentrated in ore-bearing fluids (Titley and Bean, 1984). The clarification of the reasons of association of V with Cu and Zn and Pb with Cu group of elements in the intrusive facies rocks is characterized by its uncertainty here (Nikolayev et al., 2016). Geochemical analyses indicate that there is a relationship between Cu and trace elements Mo, Ag, As, Bi, Gd, Co, Cr, Se, Ge, Li, and Nb in the Goshgarchay deposit. Copper shows a positive correlation with Ag, As, Bi, Cd, Ce, Ge, Sr, Mo, Sb, Se, Th, and Ti, but has a negative correlation with Co, Cr, Cs, La, Li, Pb, Ni, Nb, and Zn. In order to determine normality of elements, histograms of significant trace elements from the intrusive rocks and the surrounding rocks are presented. Copper, Mo, Ag, Pb, Zn, Se, Te, As, Sb, Sr, Co, and Cr were selected, on the basis of results of group testing. They were obtained from the ores, and also from non-mineralized and weak-mineralized rocks, as shown in Figure 4. Copper, Pb, Sr, Zn, Co, and Cr display an abnormal distribution in the surrounding rocks. Whereas, Ag, As, Mo, Pb, Sb, and Cr display a normal distribution in

the ore-bearing mass from the Goshgarchay porphyry deposit. Therefore, we can conclude that elements display two different patterns in the ore-bearing intrusive and the surrounding rocks: a normal definition in the former and lognormal definition in the latter (Mansurov, 2021).

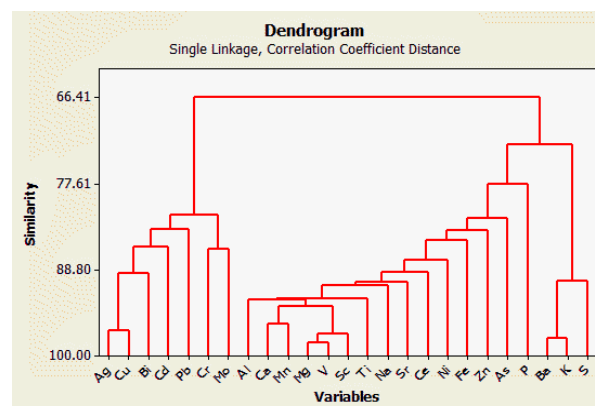


Fig. 3. Cluster analysis of elements in the surrounding rocks of the Goshgarchay magmatic system

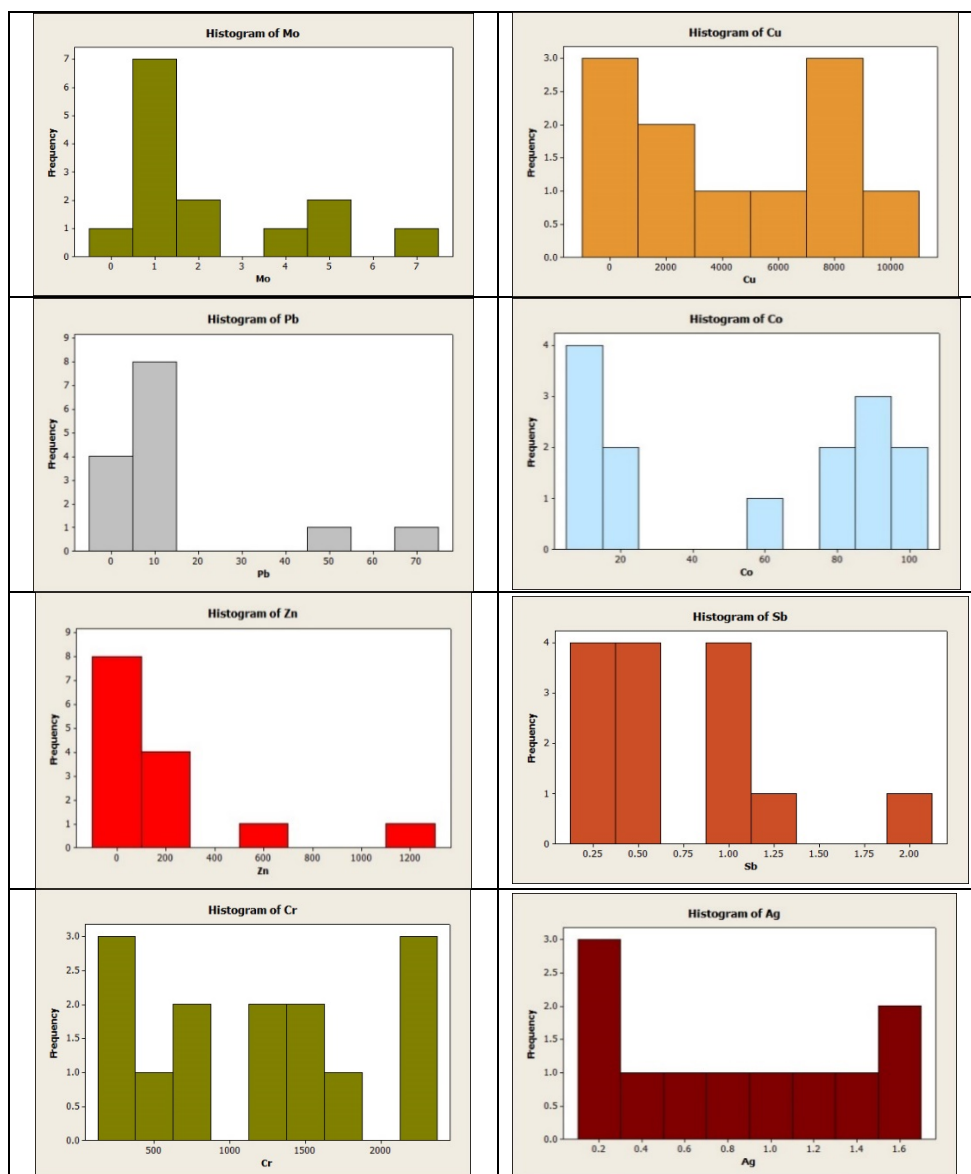


Fig. 4. Histograms of Mo, Cu, Pb, Co, Zn, Sr, Cr, and Ag for the Goshgarchay magmatic system

According to the properties of the definition of indicator elements, the associated elements have been studied more than ore elements which are from porphyry copper deposit ores and their scattering areas. Deposits with different contents are characterized by steadiness of the selection of indicator elements. These elements-Ba, As, Sb, Ag, Pb, Zn, Au, Bi, Cu, Mo, W, Sn, Co and B are considered for porphyry copper deposits. Series of the mentioned elements have been generalized and they are not always constant for all porphyry copper deposits (Rekharskiy et al., 1983; Mongush and Lebedev, 2013).

For the solution of the advanced problem, behavior features of chemical elements have been investigated in mineral associations and ore surrounding rocks and a few point dependence graphics reflecting dependence relations between elements have been set up. In order to study definition features of indicator elements, the interaction between them was investigated and on the basis of them statistical analysis of geochemical properties of the deposits was made. As shown in the analysis, the dependence of element pairs is symmetrically repeated with respect to diagonal. Dependent variables are shown in the vertical axis and independent variables are shown in the horizontal axis. Point clouds were drawn in the precise direction for separate elements. It's explained so, the ore mass has undergone sharp enrichment in the upper part of the deposit due to oxidation process. Therefore, an increase in frequency of Cu-bearing minerals was observed in the surface. Newly formed sulfides (chalcocite, covellite, bornite, and malachite) appeared in the oxidation zone. The products of both hypogene and hypergene minerals are selected. There is appositive relationship between X and Y. Most part of all point clouds are located along the straight line in the relations graphic of Cu and Mo with other components. But a part of point clouds is located beyond the line. It is a normal case in the definition of elements and contents of elements are not dependent of this straight line. It confirms that all aforementioned elements are the product of geochemical processes.

**Discussion.** Correlation of Cu and Mo with chalcophile elements, such as As, Sb, Cu, Bi, Cd, Ga, In, Ge, Au, Ag, and Te, and siderophile elements, such as Co, Ni, Mo, Te, and Cr is given in Fig. 5 and 6. The definition of element mixtures in various type of ores and ore metals is unequal and their concentration varies a thousand times more than their contents of Clarke and coefficient of concentration (Babazadeh et al., 1990; Mansurov, 2013). There is a positive correlation between Cu and Ag, As, Bi, Cd, Ge, Co, Mo, Cr, Ni, Pb, and Rb, as shown in Fig. 6. Whereas, Cu has a negative correlation with Co, Cr, Cs, La, Li, Pb, Rb, Ni, Nb, and Zn (Mansurov, 2021).

According to Grabejev and Chashchukhina, (1985), the interpretation of geochemical information helps us to determine relationship among elements. Geochemical relations between ore elements within the deposit and separate spheres of the deposit is explained by significant features of the studied elements.

It should be mentioned that maximal concentration zone of Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Se, Te and other elements can be different in the evolution of differentiation of postmagmatic solutions which has a series of copper-porphyry deposits containing complicated formation condition. Similar case is possible to observe in the deposits owing to repetition of inclusion of hydrothermal fluids (Bortnikov et al., 2008).

Rekharski et al. (1983) noted that the existence of direct (straight) relations between the price of ore value and the price close to Clarke amount of the studied elements is considered essential indicator.

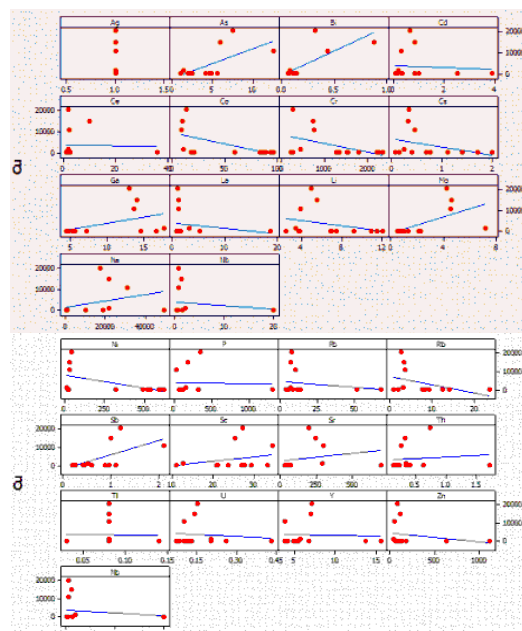


Fig. 5. Correlation Cu with Ag, As, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Ga, La, Li, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Sb, Sc, Sr, Th, Ti, U, Y, Zn, and Nb in the Goshgarchay porphyry copper deposit

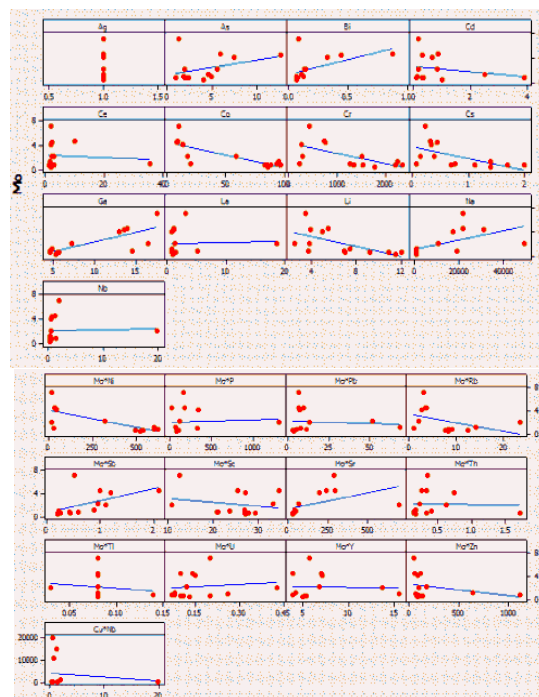


Fig. 6. Correlation of Mo with Ag, As, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Ga, La, Li, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Sb, Sc, Sr, Th, Ti, U, Y, Zn, and Nb in the Goshgarchay porphyry-copper deposit

Direct dependence is observed for ore mass between concentrations of Cu, Mo, Zn, Ag, Se, Te, and other elements in the Goshgarchay porphyry Cu deposit. This dependence confirms that these elements occupy place in the same hydrothermal column in space and time evolution of solutions within ore-magmatic system and in the transportation of these elements along with deposit zone. Three various mineral associations differing from one another participate in porphyry copper mineralization: 1) primary sulfide minerals; 2) oxidized ores; 3) primary

sulfide minerals significantly enriched with the products of hydrothermal ore-carrying solutions.

### Conclusions.

1. Granitoid intrusiveness associated with porphyry copper mineralization in the Goshgarchay magmatic system belong to the later Jurassic-early Cretaceous gabbro-diorite-granodiorite.

2. There is a positive correlation among the studied elements, representing a similar geochemical behavior.

3. Cloud of points extend in completely clear direction for separate elements (especially Cu, Mo, Pb, and Zn). It is due to the fact that the upper part of ore mass in the Goshgarchay deposit has undergone sharp enrichment owing to oxidation process during the progress of abrasion shell sphere.

4. As seen from correlation relation between elements copper-porphyry mineralization is characterized by the mixture of elements in a wide spectrum. Here include both chalcophile elements (As, Sb, Cu, Bi, Cd, Ga, In, Ge, Au, Ag, and Te) and siderophile elements (Co, Ni, Mo, Fe, and Cr).

5. Direct dependence is observed for ore mass between concentrations of Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Se, Te and other elements in the Goshgarchay porphyry copper deposit.

6. Three various mineral associations differing from one another participate in stock work type copper-porphyry mineralization: 1) primary sulfide minerals; 2) oxidized ores; 3) primary sulfide minerals significantly enriched with products of hydrothermal ore carrying solutions.

### References

- Abdullayev, R.N., Mustafayev, G.V., Mustafayev, M.A. (1988). Mesozoic magmatic formations of the Lesser Caucasuses and associated endogenous mineralization. Baku: Elm. [in Russian]
- Baba-zadeh, V.M., Makhmudov, A.I., Ramazanov, V.G. (1990). Copper and molybdenum porphyry deposits: Baku: Azerneshr. [in Russian]
- Borisenko, I.D., Borovikov, A.A., Borisenko, A.S., Gaskov I.V. (2017). Physicochemical conditions for the formation of ores at the Samolazovskoe gold deposit (Central Aldan). *Geology and geophysics*, 58 (12), 1915-1927. [in Russian]
- Bortnikov, N.S., Simonov, V.A., Bogdanov, Yu.A. (2008). Fluid inclusions in minerals from modern sulfide structures: physicochemical conditions of mineral formation and fluid evolution. *Geology of ore deposits*, 46 (1), 74-87. [in Russian]
- Geology of Azerbaijan. Magmatism. (2003). Baku: publishing house Nafta-Press. [in Russian]

Geology of Azerbaijan. Tectonics. (2005). Baku: publishing house Nafta-Press. [in Russian]

Grabezhev, A.I. Chashchukhina, V.A. (1985). On the correlation between the elements of porphyry-copper deposits. *Geochemistry*, 12, 1792-1794. [in Russian]

Imamverdiyev, N.A., Baba-zadeh, V.M., Mansurov, M.I., Abdullayeva, Sh.F. (2020). Rare-Earth elements in magmatic and metasomatic rocks of Murovdag ore area (Lesser Caucasus). *Geochemistry International*, 2, 229-234.

Mansurov, M.I. (2013). Geological-genetical genetic model of Goshgarchay ore-magmatic system of Murovdag uplift. (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Journal of News of ANAS. Earth Sciences*, 4, 16-22. [in Russian]

Mansurov, M.I. (2014). Models of ore-magmatic systems of copper-porphyry of deposits of Goshgarchay ore field (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Journal of News of the Siberian department of the section of earth Sciences of the Russian Academy Natural of Sciences. Geology, Exploration and Development of mineral deposits*, 4(47), 29-42. [in Russian]

Mansurov, M.I. (2021). Distribution peculiarities of basic ore components in Goshgarchay porphyrous copper deposit (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 54, 96-105. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-07>.

Mansurov, M.I. (2021). Location Peculiarities and evolution of Goshgarchay copper-porphyre field (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (93), 41-51. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.93.05>.

Mineral-raw resources of Azerbaijan (Formation conditions, distribution patterns, scientific basis of prediction). (2005). Ed. by V.M. Baba-zadeh. Baku: Ozan, 808. [in Russian]

Mongush, A.-D.O., Lebedev, V.I. (2013). Ak-Sug copper-molybdenum-porphyry deposit: material composition of rocks and ores. *Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits*, 1(42), 22-29. [in Russian]

Nikolaev, Yu. N., Baksheev, I.A., Prokofiev, V.Yu., Nagornaya, E.V., Marushchenko, L.I., Sidorina, Yu.N., Chitalin, A.F., Kalko, I.A. (2016). Au-Ag mineralization of porphyry-epithermal systems of the Baim zone (Western Chukotka, Russia). *Geology of ore deposits*, 58 (4), 319-345. [in Russian]

Pavlova, I.G., Sakhnovsky, M.L. (1988). Models of ore-magmatic systems of molybdenum-copper porphyry deposits as a basis for their prospecting and forecasting. Ore formation and genetic models of endogenous ore formations. Ed. By A.A. Obolensky, V.I. Sotnikova, V.N. Sharapova. Novosibirsk: Science. [in Russian]

Popov, V.S. (1977). Geology and genesis of copper-molybdenum-porphyry deposits. Moscow: Science. [in Russian]

Ramazanov, V.G. (1993). Porphyry- copper formation of Azerbaijan. Baku: Elm, 45. [in Russian]

Rekharsky, V.I., Varyash, L.N., Kapsamun, V.P. (1983). On the genesis of molybdenum and copper mineralization of copper-molybdenum deposits. In the book "Genetic models of endogenous ore deposits". Vol.1. Novosibirsk: Nauka, 135-143. [in Russian]

Sillitoe, R.H. (1996). Granites and metal deposits. *Episodes*, 19, 126-133.

Sillitoe, R.H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Society of Economic Geologists. Inc. Economic Geology*, 105, 3-41.

Titly, S.R., Bean R.E. (1984). Porphyry copper deposits. Genesis of ore deposits. Moscow: Mir. [in Russian]

Надійшла до редколегії 21.05.22

М. Мансуров,  
E-mail: [matoy\\_mansurov@mail.ru](mailto:matoy_mansurov@mail.ru);  
Бакинський державний університет,  
вул. 3. Халілова, 23, м. Баку, AZ1148, Азербайджан

## ГЕОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РУДНО-ПОРФІРОВОЇ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ У МАГМАТИЧНІЙ СИСТЕМІ ГОШГАРЧАЙ (МУРОВДАРСЬКИЙ РАЙОН, АЗЕРБАЙДЖАНСЬКА ЧАСТИНА МАЛОГО КАВКАЗУ)

Вивчено геохімічні особливості інтрузивних і вміщуючих порід, пов'язаних із мідно-порфіровим оруденням у Гошгарчайській магматичній системі. Виявлено основні фактори концентрації мідної та мідно-порфірової мінералізації в породах габро-діорит-грандіоритової формації. Установлено, що структура цього рудного району сформувалася в результаті послідовної зміни кількох етапів деформації, що супроводжувалися розвитком тріщин в інтрузивному масиві, упродовженням даєк, зсувами по розломах і тріщинах.

Визначено основні компоненти руди та розглянуто відношення між елементами. За результатами кластерного аналізу проаналізовано геохімічні асоціації, що дозволяють локалізувати область розвитку орудення в різних стадіях формування мідно-порфірової системи. Як стабільні елементи розглянуто Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, Mn, Ti, Cr, V, Sr як у вміщуючих породах, так і в рудноносних інтрузивних. Цю групу елементів можна розглядати як елементи-індикатори в мідно-порфірових породах.

Результати кластерного аналізу показують, що менш характерні для гідротермальних розчинів елементи (Mn, Ti, Cr, V, Sr) зберігають свободу в усіх наеколожильних породах, а існування їхніх асоціацій, імовірно, пов'язане із процесом їх перенесення із силікатних порід. Такі елементи, як Cu, Mo, Ag, Pb і Zn, утворюють вільну групу і пов'язані з утворенням із магматичного джерела у процесі кристалізаційної диференціації та впливу на породи гідротермальної активності, яка вважається джерелом цих елементів. Аналіз графіків, складених за результатами вмісту Cu та основних рудних компонентів (Mo, Ag, As, Bi, Ga, Co, Cr, Se, Ge, Li, Nb тощо) у рудах Гошгарчайського родовища, показує їхню залежність один від одного в однаковому ступені. Кількість Cu в руді має позитивний кореляційний зв'язок з Ag, As, Bi, Cd, Ce, Ge, Sr, Mo, Sb, Th і Ti, а з Co, Cr, Cs, La, Li, Pb, Rb, Ni, Nb, Zn – негативний. Для рудної маси спостерігається пряма залежність між концентраціями Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Se, Te та іншими елементами мідно-порфірового родовища Гошгарчай. У мідно-порфіровому оруденні штокверкового типу беруть участь три різні мінеральні асоціації: 1) первинні сульфідні мінерали; 2) окиснені руди; 3) первинні сульфідні мінерали, значно збагачені продуктами гідротермальних рудноносних розчинів.

Ключові слова: мідно-порфірове орудення, Гошгарчай, геохімія, основні рудні компоненти, точкова залежність, кореляційні зв'язки.

УДК 553.495 (477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.08>

О. Ганжа, канд. геол. наук, наук. співроб.,

E-mail: oag2909@gmail.com;

Г. Кузьманенко, канд. геол. наук, наук. співроб.,

E-mail: geology7@ukr.net;

Т. Охоліна, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: svilya@ukr.net;

О. Ремезова, д-р геол. наук, доц.,

E-mail: elena.titania2305@gmail.com;

Інститут геологічних наук НАН України,

вул. О. Гончара, 55 б, м. Київ, 01054, Україна

## СУЧАСНИЙ СТАН МІНЕРАЛЬНО-СИРОВИННОЇ БАЗИ РОЗСИПНИХ РОДОВИЩ ТИТАНУ УКРАЇНИ

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

Проаналізовано сучасний стан світових титанових родовищ та місце України у світі за запасами титанових руд. Наведено перелік країн-лідерів за запасами розсіпних титан-цирконієвих руд і динаміку їх видобутку, а також перелік наявних гірничих підприємств зі збагачення і виробництва титанових виробів у межах України. Закономірності співвідношення країн у лідерстві за запасами та видобутком не спостерігається. Показано карту країн, куди Україна експортує титанову сировину, і динаміку цін на діоксид титану за останні п'ять років. Представлено загальну характеристику мінерально-сировинної бази титану України з картою сучасного стану ільменітових і комплексних циркон-ільменітових розсіпів української розсіпної провінції.

**Ключові слова:** титанові родовища, діоксид титану, комплексні циркон-ільменітові розсіпи, Україна, запаси мінералів титанової групи.

**Постановка проблеми.** Постійне зростання попиту на мінеральну сировину, а особливо певних її видів, вимагає повної консолідації світової спільноти. Відбувається поступове заміщення впливу вуглецевої сировини (нафта, газ тощо) застосуванням електричних автомобілів, вітрових турбін, сонячних панелей і енергетичних сховищ. Такий технологічний зсув залежить від надійного доступу до критично важливих сировинних матеріалів, що використовуються для цих приладів. ЄС визначив 30 сировинних матеріалів, які є критичними для такого переходу. Україна має резерви за 21 із цих 30 найменувань. У зазначеному переліку важливе місце посідають мінерали титанової групи.

Зазначається безпосередній зв'язок між споживанням титану й економічним розвитком країни. Найбільшими споживачами титану у світі (понад 80 %) є країни з найвищими показниками ВВП: Велика Британія, США, Японія, Німеччина, Франція, Китай, Італія та ін.

За підсумками конференції "Стратегічне партнерство між Європейським Союзом і Україною у сфері критичної сировини та батарей" (17.04.2022) було підписано Меморандум про розуміння щодо критичної сировини, а також наголошено, що Україна і ЄС мають здійснити кроки, щоб сприяти інвестиціям і створити можливості для фінансування. Тому виникає необхідність у висвітленні сучасного стану мінерально-сировинної бази титану України, а також ролі України у світовому видобутку мінералів титанової групи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасному світі особливо актуальним є питання дослідження особливостей хімічного складу, умов накопичення та ресурсів мінералів титанової групи. У своїх публікаціях ці питання підіймали дослідники з усього світу. Серед останніх слід виділити К. Перкса (Perks and Mudd, 2021), М. Поунсебі (Pownceby, 2010), Г. Мадд (Mudd and Jowitt, 2016), Г. Мейнхольда (Meinhold, 2010), В. Бруккарда (Bruckard et al., 2015), Ван Госена (Van Gosen et al., 2019), Л. Рейнеке (Reyneke and Wallmach, 2007), Р. Адамса (Adams, 2017), Х. Чі (Chi et al., 2001), А. Брітта та ін.

Серед української наукової школи слід відзначити Л. С. Галецького, О. О. Ремезову, Д. П. Хрущова, С. М. Цим-

бала, М. С. Ковальчука, О. О. Комлева, Т. В. Охоліну, О. А. Ганжу, Ю. В. Крошко, С. П. Василенко та багатьох інших (Galetskyi and Revezova, 2011; Khrushchov et al., 2017; Ganzha et al., 2019; Komliev et al., 2021). Зокрема, під керівництвом Д. П. Хрущова було розроблено методику структурно-літологічного моделювання титан-цирконієвих розсіпів, яка успішно була застосована на таких родовищах, як Злобицьке, Тарасівське, Зеленоярське, Краснокутське, Бирзулівське, Воскресенівське тощо.

Дані К. Перкса (Perks and Mudd, 2021) свідчать, що 327 родовищ корисних копалин у 25 країнах містять 2648 млн т  $TiO_2$  в ільменіті; в рутилі та лейкоксені – 155 млн т; мінералів Zr – 23,5 млн т. Лише 31 %  $TiO_2$  існує у традиційних осадових відкладах (розсіпні та палеорозсіпні відклади), а решта міститься в магматичних (54 %), метаморфічних (1 %) і латеритних відкладах (14 %). Однак розсіпні родовища залишаються провідним і найбільш рентабельним типом родовищ титану у коротко- та середньотерміновій перспективі. Наприклад, за одними джерелами, близько 96 % циркону, 90 % рутилу, 30 % ільменіту та 80 % монациту, видобутого світовою промисловою індустрією корисних копалин, було отримано з покладів прибережних розсіпів (Chi et al., 2001); інші посилання свідчать, що у 2020 році на розсіпні родовища припадало близько 60 % виробництва ільменіту та лейкоксену і 100 % виробництва рутилу та циркону (USGS, 2021).

Існує різна аналітика стосовно світових лідерів за запасами мінералів титанової групи (Van Gosen et al., 2019; Perks and Mudd, 2021), однак завжди незмінними лідерами залишаються Австралія і Китай.

Важливо зазначити, що більшість титанових мінеральних ресурсів Китаю належать не до розсіпних родовищ, а до первинних магматичних у вигляді ванадієвих титаномангнетитових руд – такі поклади становлять 94 % від загальних запасів оксиду Ti (близько 800 млн т) (Liu et al., 2016), а розсіпні родовища – решту, тобто 6 %.

Запаси ж Австралії представлені розсіпними прибережно-морськими, частково похованими, комплексними ільменіт-рутил-циркононими родовищами, причому оцінка цих запасів суттєво відрізняється у різних авторів.

© Ганжа О., Кузьманенко Г., Охоліна Т., Ремезова О., 2022

Наприклад, (Mudd and Jowitt, 2016) оцінюють вимірні ресурси в 435,2 млн т ільменітового, 60,7 млн т рутилового та 111,4 млн т цирконового концентрату; USGS підрахувала, що запаси Австралії становлять 150 млн т ільменіту, 27 млн т рутилу та 48 млн т діоксиду цирконію (Perks and Mudd, 2019). Брітт та ін. (Britt et al., 2016) оцінюють її запаси в 267,8 млн т ільменіту, 36,9 млн т рутилу та 81,4 млн т циркону. Різниця в цих показниках залежить від оцінки запасів або ресурсів (в одних випадках не враховані запаси, які недоступні для видобутку через екологічні обмеження, політику уряду або військові землі), а також від перерахунків запасів ільменіту в  $TiO_2$ .

Незмінним залишаються запаси України в рейтингу світових запасів, оскільки, незважаючи на величезні запаси ільменіту, існує проблема невисвітленості наших даних у рейтингових світових журналах. Камерон Перкс та ін. (Perks and Mudd, 2021) представили запаси  $TiO_2$  в Україні як 6,4 млн т, що далеко не відповідає дійсності. Ще в 1956 р. попередні запаси Малишевського (на той час Самотканського) родовища були затверджені ДКЗ СРСР за категоріями  $A_2+B+C_1+C_2$  у кількості 4339 тис. т титану і 678 тис. т цирконію (Вадимов, Тимошенко, 1958). А це хоч і найбільше розсіпне, проте тільки одне з багатьох родовищ України. Насправді, за підрахунками українських вчених, близько 20 % запасів і ресурсів світу належать Україні (Галецький, Ремезова, 2007).

**Розгляд нерозв'язаних аспектів загальної проблеми.** Аналіз літературних джерел демонструє невтомний розвиток науки і промисловості. Статистичні дані постійно змінюються і вимагають оновлення та зведення уже отриманої інформації. Тому виникає необхідність у висвітленні впливу титанової галузі України на економіку як самої країни, так і її частини у світовому титановому експорті, дослідженні динаміки цін на основні мінерали титанової групи, представленні діючих підприємств титанової галузі України та можливості їх розширення за рахунок існуючих перспективних ільменітових і титан-цирконієвих родовищ.

**Світовий видобуток титану.** У рейтингу світового видобутку мінералів титанової групи Україна займає

шосте місце (0,53 млн т). За підсумками 2021 р. світовий видобуток двоокису титану з ільменіту і рутилу представлено на рис. 1. Лідером з видобутку титанових мінералів є Китай, який добув 3,0 млн т діоксиду титану, що більш ніж удвічі перевищує видобуток Південної Африки, яка посіла друге місце (1,0 млн т); у п'ятірку лідерів також входять Мозамбік (0,97 млн т), Канада (0,6 млн т) і Австралія (0,6 млн т), яка за сукупним видобутком ільменіт + рутил випереджає Норвегію (0,44 млн т).

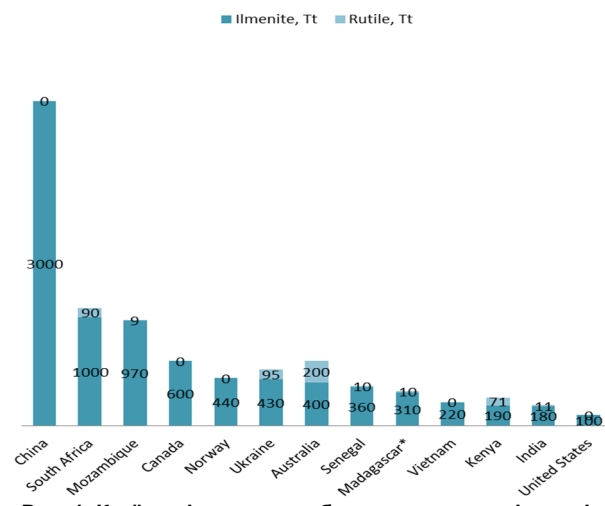


Рис. 1. Країни-лідери з видобутку титанових мінералів (ільменіту та рутилу) у 2021 році (Mine production of titanium minerals worldwide..., 2021)

За сучасної, досить високої, ціни на ільменітовий концентрат (більше 150 \$ за тону) Україна експортує свою сировину до більш ніж 30 країн світу: Китаю (близько 20 % від усього імпорту), Німеччини (12,5 %), Російської Федерації (11 %), Естонії (10 %), Італії (10 %), Кореї (9 %), Нідерландів (8 %), Індії (5 %), США (4 %), Чеської Республіки (4 %), Об'єднаних Арабських Еміратів (2,5 %) та ін. (рис. 2).

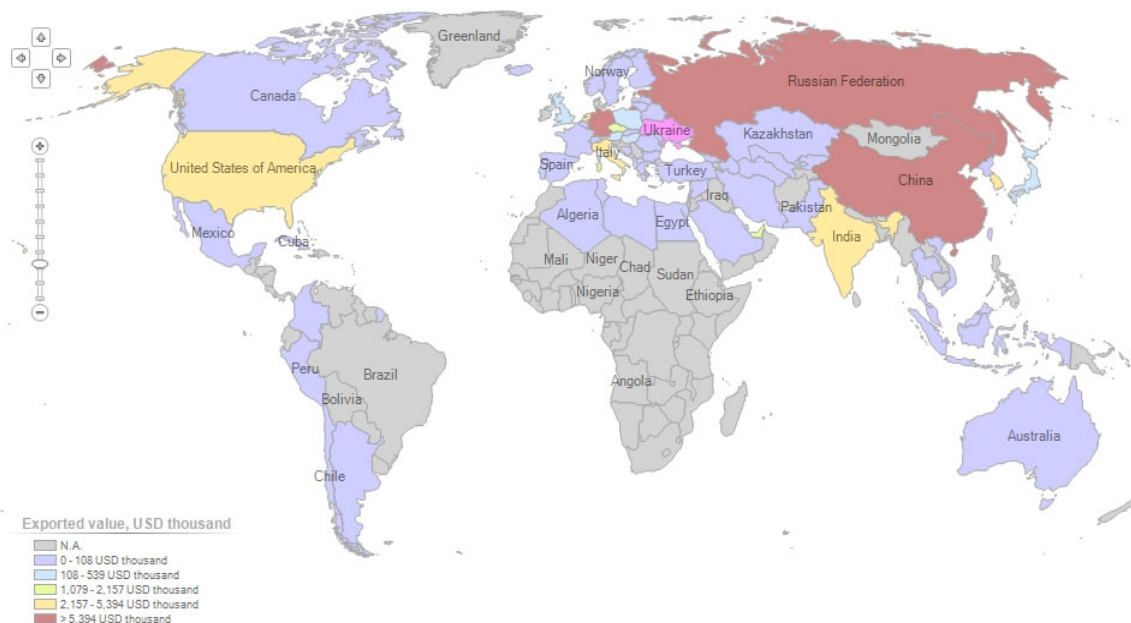


Рис. 2. Перелік країн, куди Україна експортує титан і вироби з нього (за даними Державної служби статистики України, 2020)

В Україні титанова сировина проходить через три етапи: видобування рудної маси на розсипних кар'єрах (на території України лише відкритим способом), збагачення отриманої маси до концентратів (гірничо-збагачувальні та гірничо-металургійні комбінати) і виробництво базової титанової продукції (титанові злитки тощо).

**Діючі гірничі підприємства України.** За даними *(Карта спеціальних дозволів..., 2022)* на сьогоднішній день титанову мінеральну сировину видобувають і збагачують чотири компанії, дві з яких мають філії.

1. Об'єднана гірничо-хімічна компанія (ОГХК), яка утворилась у 2014 році шляхом об'єднання потужностей Вільногірського гірничо-металургійного комбінату (ГМК) у Дніпропетровській області та Іршанського гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК) у Житомирській області, на двох філіях – Вільногірській та Іршанській – здійснюється збагачувальне виробництво концентратів титанових руд (АТ ОГХК..., 2022).

На Вільногірському ГМК розробляється унікальне Малишівське (Самотканське) родовище, видобуток титан-цирконієвих руд здійснюється з 50-х років минулого століття. За даними (АТ ОГХК..., 2022), запаси на цьому родовищі майже вичерпані й у найближчі 5–10 років родовище буде повністю відпрацьоване.

Іршанський ГЗК здійснює розробку ділянок Юрська, Осинаво та Букінська Межиріченського родовища.

Крім двох згаданих вище родовищ, у 2021 році ОГХК було придбано ліцензію на геологічне вивчення, у тому числі й дослідно-промислове розроблення родовищ загальнодержавного значення, зокрема Селищанського, розташованого в Житомирській області. На сьогодні жодні роботи в межах цього родовища не проводяться.

Саме Іршанський ГЗК має великі можливості з нарощування сировинної бази, оскільки в його межах розташована велика кількість розсипних родовищ, частина з яких перебувають на державному балансі, частина попередньо розвідані, а є родовища на стадії пошуково-оціночних робіт.

2. Диверсифікована міжнародна група компаній, основні інвестиції якої зосереджені в азотному, титановому та газовому бізнесах (Group DF) *(Диверсифікована міжнародна група компаній..., 2022)*, до якої входять:

1) ТОВ "Мотронівський гірничо-збагачувальний комбінат" (Дніпропетровська обл., Україна). На цьому підприємстві здійснюється розроблення Мотронівсько-Аннівської ділянки Малишівського родовища, яка введена в експлуатацію у 2018 році, і нині підприємство ще не повністю виходить на промислові потужності. Також цьому підприємству належить Північно-Західна ділянка Малишівського родовища, яке теж поки не відпрацьовується у зв'язку з невеликим вмістом корисного компонента і великим коефіцієнтом розмірності.

ТОВ "Межиріченський гірничо-збагачувальний комбінат" розробляє Ісаківську ділянку Межиріченського родовища, яке розташоване в смт. Іршанськ, Житомирська область, Україна.

ТОВ "Валки-Ільменіт" (Іршанськ, Житомирська обл., Україна) веде видобуток Валки-Гацківського родовища.

3. ТОВ "Велта" *(Титан сьогодні..., 2022)* розробляє Бирзулівське родовище титанових руд, яке розташоване у Новомиргородському районі Кіровоградської області.

Цей гірничо-збагачувальний комбінат має великі можливості нарощування сировинної бази, оскільки неподалік є ще п'ять родовищ на різних стадіях розвитку. З метою нарощування сировинної бази діючого ГЗК у 2019 році компанія взяла ліцензію терміном на 20 років на видобуток Лікарівського родовища, що є другим за запасами в цьому регіоні після Бирзулівського.

4. ТОВ "Демурінський ГЗК" нині розробляє запаси титано-цирконієвих пісків Вовчанського родовища для видобутку ільменітового, рутилового, цирконієвого, кіаніт/сіліманітового і ставролітового концентратів (ТОВ "Демурінський ГЗК", 2022).

5. ТОВ з і.п. "Кольорові метали" розробляє західну та східну ділянки родовища Балка Крута, яке є техногенним родовищем циркон-рутил-ільменітових рудних пісків Малишівського родовища *(Мінеральні ресурси України..., 2021)*.

6. За даними *(Карта спеціальних дозволів..., 2022)*, ТОВ "ЖИТОМИРБУРРОЗВІДКА" належать ліцензії на видобуток Тростянецького та Лівобережного розсипних родовищ ільменіту. Ліцензії було придбано у 2013 році, термін дії ліцензій – 20 років, але на сьогоднішній день розроблення цих родовищ не проводиться.

В Україні переробку концентратів ільменіту титанових родовищ з отриманням пігментного діоксиду титану ведуть ПАТ "Сумихімпром" і ТОВ "Запорізький титано-магнієвий комбінат". До продукції ПАТ "Сумихімпром" належать шість видів діоксиду пігментного титану *(Сумихімпром..., 2022)*. ТОВ "Запорізький титано-магнієвий комбінат" виготовляє титанові злитки, губчатий титан, титановий шлак, тетрафторид титану очищений, сплав на основі заліза, виливки титанові фасонні та феротитан *(Запорізький титано-магнієвий комбінат..., 2022)*.

В Україні виробляється до 1 млн т титанових концентратів на рік, при цьому основні їхні обсяги відправляються на експорт, тому що потужності виробництва концентратів значно перевищують внутрішній попит. Саме експорт концентратів дає в титановій галузі значну виручку. За інформацією, отриманою від Держстату, у 2020 році було реалізовано руд і концентратів титанових вартістю 4 591,59 млн грн. Дані звітів, наданих компаніями АТ "Об'єднана гірничо-хімічна компанія" і ТОВ ВКФ "Велта", дещо відрізняються (табл. 1). Основними внутрішніми споживачами ільменітових концентратів є "Запорізький титано-магнієвий комбінат" і "Сумихімпром" (виробництво діоксиду титану). Проектна потужність ЗТМК – 20 тис. т губчастого титану на рік. Однак через зношування виробничих фондів підприємство може випускати тільки 10 тис. т. Споживач рутилового концентрату – компанія "Плазматек" (виробництво зварювальних електродів). Також в Україні організоване виробництво безшовних титанових труб авіаційного і загального призначення – ТОВ "ВСМПО Титан Україна", яке є "дочкою" російської компанії "ВСМПО-АВІСМА", що в умовах війни Росії проти України є неприйнятним *(Скільки титану в Україні..., 2020)*.

Таблиця 1

Виручка від реалізації товарної продукції власного видобутку підзвітними компаніями галузі з видобування руд титану у 2020 р. *(Портал даних видобувної галузі України..., 2022)*

| Підприємство                            | Обсяги видобування незбагаченої руди | Обсяги реалізації товарної продукції, тис. т | Виручка від реалізації товарної продукції на території України (без ПДВ), млн грн | Виручка від експорту товарної продукції (без ПДВ), млн грн |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| ТОВ ВКФ "Велта"                         | 213,11 тис. т                        | 212,06                                       | 53,85                                                                             | 1 043,40                                                   |
| АТ "Об'єднана гірничо-хімічна компанія" | 6 932,00 тис. м <sup>3</sup>         | 560,96                                       | 687,56                                                                            | 2 438,21                                                   |
| Всього                                  | -                                    | 773,02                                       | 741,41                                                                            | 3 481,61                                                   |

З табл. 1 видно, що обсяги реалізації продукції компаній-виробників титанових концентратів на внутрішньому ринку в кілька разів нижчі, ніж на експорт, тобто ситуація, коли основний обсяг концентратів титанових мінералів спрямовується на експорт, пов'язана з дефіцитом потужностей у переробному секторі титанової галузі, а звідси – і відсутністю значного внутрішнього споживання. Тому Україна експортує концентрат і напівфабрикати, а також продукцію з невисокою доданою вартістю: титанові шлак і губку, діоксид титану. Для порівняння: якщо ціна ільменіту на біржах становить близько \$ 300–350 за тону, ціна рутилу – \$ 1800 за тону, то ціна титанового лому і злитків – \$ 10–15 тис. за тону (*Чого очікувати від приватизації ОГХК...*, 2021).

Ситуація могла б змінитися, якби держава доклала зусиль щодо залучення іноземних стратегічних інвесторів (*Михайленко, Краснікова, 2021*). Зважаючи на значні запаси ільменітових руд, тобто сировини для виробництва титану, Україна могла б із легкістю розширити як видобування, так і виробництво титанової продукції. Розширення виробничих потужностей, а також створення нових ланок виготовлення титанової продукції може стати одним із післявоєнних кроків, необхідних для розвитку української економіки.

Важливим економічним фактором є постійне зростання цін на ільменіт та рутил. За даними (*MINERAL COMMODITY SUMMARIES...*, 2022), спостерігається динаміка зростання цін на умовах CIF на рутил, ільменіт і лейкоксен, насипний ільменіт і титановий шлак. Для оцінювання розглянемо період із 2017 по 2021 рік (рис. 3). Спостерігається зростання цін на всі компоненти титанової сировини. За цей період вартість рутилу збільшилася майже вдвічі, що пов'язано з розширенням його використання у високотехнологічних галузях, таких як авіаційна промисловість, медицина тощо. Останнім часом також розвивається виробництво біметалічних сполук і труб: титан + мідь, титан + ніобій, титан + тантал, титан + нейтралізуюча сталь, титанових труб з відносно великою товщиною стінок та акумуляторів, у тому числі літій-титанових, що викликає підвищений попит на сировину для металічного титану. Вартість ільменіту та лейкоксену за останні п'ять років зросла із 393 до 640 \$ США за тону. Більш стабільна цінова політика тримається для насипного ільменіту і титанового шлаку.

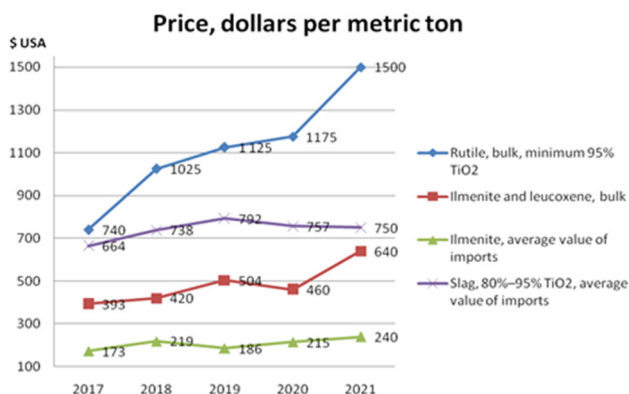


Рис. 3. Динаміка зростання цін на умовах CIF на рутил, ільменіт і лейкоксен, насипний ільменіт і титановий шлак у період 2017–2021 років. Побудовано за даними USG

**Мінерально-сировинна база титану України.** Враховуючи наявність в Україні значних запасів ільменіту та рутилу, діючих гірничо-збагачувальних і гірничо-металургійних комбінатів, постійне збільшення попиту на

титанову сировину в сучасному світі, що супроводжується зростанням її вартості, можна впевнено стверджувати про наявність перспектив розвитку титанової галузі в Україні.

Родовища титану в Україні представлені різними генетичними типами: розсипними алювіальними і прибережно-морськими розсипами, залишковими і корінними родовищами.

Корінні родовища України становлять 53,6 % всіх запасів, прибережно-морські циркон-рутил-ільменітові розсипи – 27,2 %, ільменітові алювіальні розсипи – 8,9 %, кори вивітрювання – 10,3 % (*Галецький, 2009*). Основу сучасного видобутку титан-цирконієвих мінералів України становлять розсипні та, частково, залишкові родовища. Видобуток ведеться безпосередньо з похованих прибережно-морських і алювіальних розсипів.

Слід зазначити, що за якісними характеристиками родовища титану в Україні загалом не поступаються зарубіжним аналогам. Вміст ільменіту в родовищах України, що розробляються, коливається від 34,8 до 75,7 кг/м<sup>3</sup>. Для порівняння: у родовищі Річардс-Бей (ПАР) міститься 50 кг/м<sup>3</sup> ільменіту, Еніба (Австралія) – 37 кг/м<sup>3</sup>, Чаварра (Індія) – 122 кг/м<sup>3</sup>. Отже, вміст ільменіту в родовищах України – на рівні світових аналогів або й вищий.

Порівняно з іншими країнами Україна має значний потенціал комплексних родовищ, а також родовищ, ільменіт з яких може застосовуватись у виробництві пігментів. Родовища прибережно-морські є сировинним потенціалом для розширення виробництва титанової губки. Гірничо-геологічні умови експлуатації більшості родовищ сприятливі для експлуатації відкритим способом.

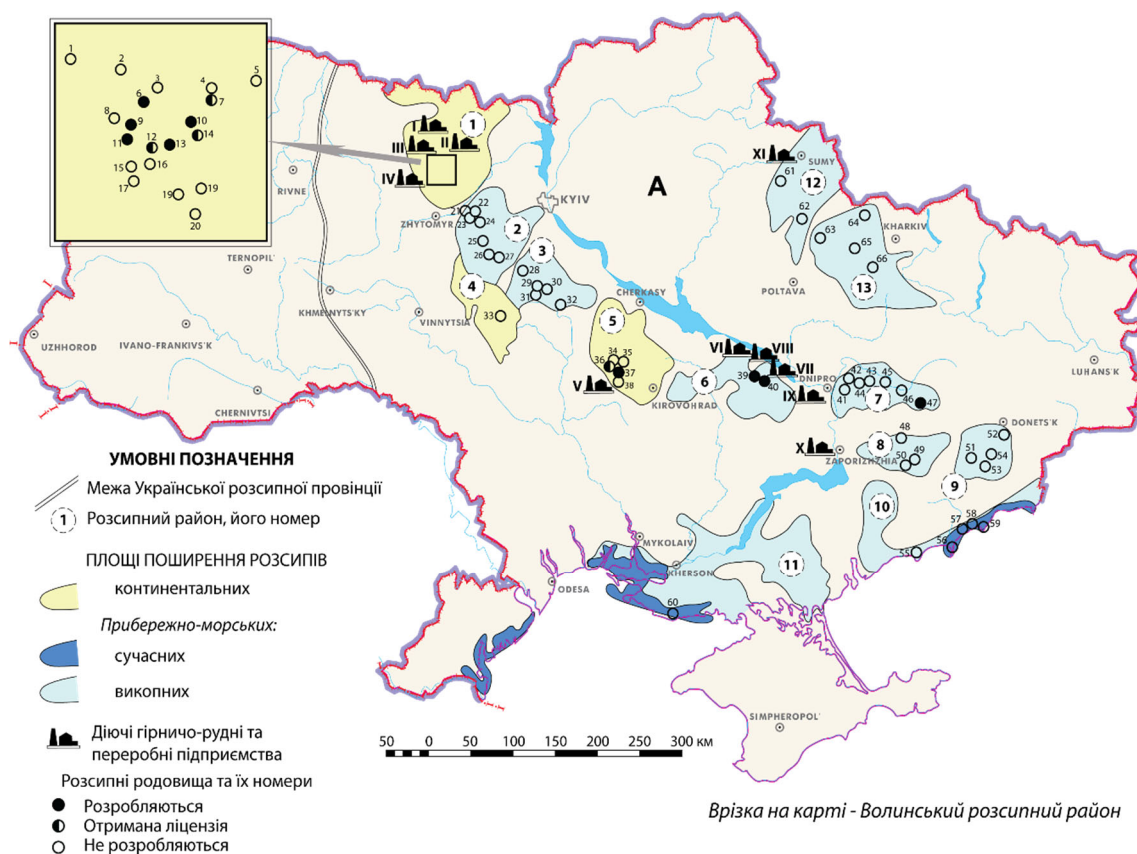
Родовища України складені в різному ступені змієним ільменітом – в родовищах Іршанської групи він становить 50–54 %, у прибережно-морських розсипах – 58–63 %. Якість руд титанових родовищ України здатна задовольнити як пігментну промисловість, так і металургію (*Галецький, Ремезова, 2011*).

На сьогоднішній день у межах України налічується більше 40 родовищ різного рівня вивченості, серед яких 2 унікальні, 12 великі, 10 середні, 4 техногенні, а також 280 перспективних рудопроявів (*Карта спеціальних дозволів...*, 2022). Всі вони розташовуються в межах української розсипної провінції, що, у свою чергу, поділяється на 13 розсипних районів (рис. 4). Основними областями розвитку давніх титан-цирконієвих розсипів на території України є Український щит і Дніпрово-Донецька западина. Розсипи утворюють дві великі зони, одну з яких простежено протягом 700 км уздовж північно-східного схилу УЩ, другу – протягом 200 км на північно-східному борті ДДЗ. У їхніх межах виявлено низку розсипних родовищ і велику кількість перспективних проявів.

Загалом серед районів української розсипної провінції можна виділити такі генетичні типи:

- поховані родовища прибережно-морського генезису (Правобережний, Лівобережний, Харківський, Гуляйпільський, Сквирський, Сумський райони);
- поховані родовища континентального генезису (Новомиргородський, Зеленоярський райони);
- сучасні родовища (частина Каховського і Токмацький райони);
- змішані: поховані прибережно-морські та континентальні (Волинський, Білоцерківський, Мокрояринський райони).

На сьогодні діючі підприємства та гірничо-збагачувальні або гірничо-металургійні комбінати зосереджені у Волинському, Правобережному, Новомиргородському та Лівобережному районах.



**Рис. 4. Сучасний стан ільменітових і комплексних циркон-ільменітових розсипів української розсипної провінції (побудована з використанням (Галецький, 2001))**

Умовні позначення: Розсипні райони: 1 – Волинський; 2 – Скви́рський; 3 – Білоцерківський; 4 – Зеленоярський; 5 – Новомиргородський; 6 – Правобережний; 7 – Лівобережний; 8 – Гуляйпільський; 9 – Мокрозялинський; 10 – Токмацький; 11 – Каховський; 12 – Сумський; 13 – Харківський.

Розсипні родовища: 1 – Ушицький розсип; 2 – Ушомирський розсип; 3 – Іванівський розсип; 4 – Злобичське родовище; 5 – Шевченківський розсип; 6 – Лемненське родовище; 7 – Селищанський розсип; 8 – Ставищанський розсип; 9 – Валки-Гацківське родовище; 10 – Іршанське родовище; 11 – Верхньоіршанське родовище; 12 – Лівобережне родовище; 13 – Межиріченське родовище; 14 – Тростянецьке родовище; 15 – Правобережне родовище; 16 – Червоноріченське родовище; 17 – Поромівське родовище; 18 – Очеретянський розсип; 19 – Видибірський розсип; 20 – Федорівський розсип; 21 – Березівський розсип; 22 – Юр'ївський розсип; 23 – Козіївський розсип; 24 – Браженецький розсип; 25 – Мар'янівський розсип; 26 – Голубятинський розсип; 27 – Почуйківське родовище; 28 – Тарасівське родовище; 29 – Улашівський поклад; 30 – Тарашанський поклад; 31 – Петровський поклад; 32 – Медвинський поклад; 33 – Зеленоярське родовище; 34 – Андріївський розсип; 35 – Новомиргородський розсип; 36 – Лікарівський розсип; 37 – Бірзулівське родовище; 38 – Валуєвський розсип; 39 – Мотронівсько-Аннівське родовище; 40 – Малишівське (Самотканське) родовище; 41 – Південне родовище; 42 – Північно-Самарське родовище; 43 – Воскресенівське родовище; 44 – Юр'ївське родовище; 45 – Петропавлівське родовище; 46 – Миколаївське родовище; 47 – Вовчанське родовище; 48 – Новомиколаївська група покладів; 49 – Ульянівський поклад; 50 – Стульнівський поклад; 51 – Мокрозялинська група розсипів; 52 – Жовтневе родовище; 53 – Лазарівський розсип; 54 – Валі-Тарамське родовище; 55 – Ногайське родовище; 56 – Бердянське родовище; 57 – Новопетрівське родовище; 58 – Ганжуківське родовище; 59 – Красноарайське родовище; 60 – Джарилгацький розсип; 61 – Лебединське родовище; 62 – Куземинське родовище; 63 – Краснокутське родовище; 64 – Богодухівське родовище; 65 – Мерчикське родовище; 66 – Нововодолазьке родовище.

Діючі гірничо-рудні та переробні підприємства: I – ТОВ "Житомирбуррозвідка"; II – ОГКХ (Іршанський ГЗК); III – Group DF (ТОВ "Межиріченський ГЗК"); IV – Group DF (ТОВ "Валки-Ільменіт"); V – ТОВ "Велта"; VI – ОГКХ (Вільногірський ГМК); VII – Group DF ТОВ "Мотронівський ГЗК"; VIII – ТОВ з і.л. "Кольорові метали"; IX – ТОВ "Демурінський ГЗК"; X – ТОВ "Запорізький титано-магнієвий комбінат"; XI – ПАО "Сумхімпро"

**Висновки.** Україна володіє значними запасами титанових руд, здійснює значний експорт титанової продукції до десятків країн світу. На сьогодні на території України розробляють розсипні (і частково – залишкові) титанові родовища. Наявність перспективних розсипних ільменітових і комплексних циркон-титанових родовищ (як найбільш рентабельних), а також низка позитивних економічних факторів (підвищення попиту на титанову сировину, постійне зростання цін, зацікавленість іноземних інвесторів тощо) створюють сприятливі умови для розроблення нових родовищ і розширення потужностей у титановому виробництві. Збільшення виробничих

потужностей і створення нових ланок виготовлення титанової продукції можуть стати одним із поствоєнних кроків, необхідних для розвитку української економіки.

Попит на металічний титан обумовлений насамперед розвитком машинобудування. З відновленням і нарощуванням виробничих потужностей машинобудування в Україні попит на титанову сировину зростатиме. У зв'язку із цим необхідно дослідити ємність ринку титанових виробів, визначити потреби в титановій сировині, оцінити обсяги експорту титанових продуктів. Найбільш потужними споживачами титанової продукції мають бути літако-, автомобіле- та суднобудування, виробництво

труб для нафтогазового комплексу, з розвитком яких зростатиме попит на ці вироби.

При цьому залишається стабільним попит на ільменітові концентрати для хімічної промисловості. Ураховуючи переважання сульфатної технології отримання пігментного двоокису титану, слід приділити увагу освоєнню таких родовищ. Це розсипи делювіально-алювіального генезису, поширені переважно у Волинському районі.

Однією із проблем розвитку розглядуваної галузі є недостатнє висвітлення мінерально-сировинної бази титану України для світової спільноти. Це є одним із перших завдань, які необхідно розв'язувати в науковій сфері. Представлено карту розсипних ільменітових і комплексних циркон-ільменітових родовищ та розсипів Української розсипної провінції, яка відображає об'єкти за ступенем їх освоєння (родовища, які розробляються; родовища, на які взята ліцензія; родовища, які стоять на балансі ДКЗ).

Незважаючи на те, що в попередні роки була підготовлена надійна мінерально-сировинна база титану на тривалу перспективу, що включає унікальні та великі родовища, ці об'єкти досліджені нерівномірно. Багато родовищ вичерпується, однак на зміну їм вводяться в експлуатацію складні за геологічною будовою, із вмістом важкозбагачуваних літологічних відмін (сильно глинисті, каоліністі відміни, дрібнозернисті піски) родовища. Питання розроблення технологічних рішень для таких родовищ можуть бути розв'язані шляхом побудови й аналізу комп'ютерних геолого-технологічних моделей родовищ, а згодом – упровадженням нових технологій видобування і збагачення.

На особливу увагу заслуговує можливість комплексного освоєння зазначених родовищ і перерахування запасів перспективних мінералів з урахуванням сучасних технологічних можливостей і за сучасними класифікаціями запасів із застосуванням найкращих світових і європейських практик. Це дасть змогу провести ранжування (переоцінювання) родовищ за пріоритетністю розроблення і виділити високоперспективні ділянки. Для економічного обґрунтування геологорозвідувальних робіт потрібні високоперспективні ділянки, які в нинішніх умовах можна виділити тільки науково обґрунтованими методами. Методика оцінювання перспективності титан-цирконієвих руд шляхом побудови візуалізації родовищ важких мінералів розробляється співробітниками Інституту геологічних наук НАН України та може бути впроваджена на засадах співпраці з діючими підприємствами.

Дослідження, що покладені в основу цієї роботи, проводилися за підтримки гранту НАН України дослідницькими лабораторіями / групами молодих учених НАН України за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки "Ретроспективно-статичне моделювання титан-цирконієвих розсипів Української розсипної провінції" (державний реєстраційний номер: 0121U110428).

#### Список використаних джерел

- АТ ОГХК. (2022). Отримано 10 квітня 2022 року, із <https://www.umcc-titanium.com>
- Вадимов, Н.Т., Тимошенко, О.Д. (1958). Генеральный подсчет запасов титана и циркония в песках Самотканского месторождения. *Отчет по научно-исследовательской работе*. Верховцево.
- Галецький, Л.С. (2009). Стан та перспективи розвитку титанового виробництва в Україні. *Звіт з науково-дослідної роботи*. Київ: Інститут геологічних наук НАН України.
- Галецький, Л.С. (Ред.). (2001). Атлас "Геологія і корисні копалини України". Масштаб 1 : 5 000 000. Київ: НАН України, Міністерство екології та природних ресурсів.
- Галецький, Л.С., Ремезова, О.О. (2007). Міжнародна конференція "Ті 2007 в СНД". *Геолог України*, 1, 3-5.
- Галецький, Л.С., Ремезова, О.О. (2011). Стратегія розвитку мінерально-сировинної бази титану України. *Геологічний журнал*, 3, 66-72.

Ганжа, Е.А., Охолина, Т.В., Крошко, Ю.В. (2019). Геологическое строение и рудоносность Зеленоярского титан-циркониевого месторождения. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*, 3-4, 26-38.

Диверсифікована міжнародна група компаній. (2022). Отримано 07 квітня 2022 року, із <https://groupdf.com/uk/nash-biznes-2/titanoviyu-biznes/>.

Запорізький титано-магнієвий комбінат. (2022). Отримано 6 березня 2022 року, із <https://zmtc.zp.ua>.

Карта спеціальних дозволів на користування надрами. (2022). ДНВП "Геоінформ України". Отримано 3 лютого 2022 року, із <https://minerals-ua.info>.

Михайленко, О.Г., Краснікова, Н.А. (2021). Конкурентоспроможність України на світовому ринку мінеральної продукції. *Економічна наука*, 7, 71-82. DOI: 10.32702/2306-6806.2021.7.71.

Мінеральні ресурси України. (2021). Отримано 04 квітня 2022 року, із [https://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2021/11/m\\_r\\_2021.pdf](https://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2021/11/m_r_2021.pdf).

Портал даних видобувної галузі України. (2022). Отримано 25 березня 2022 року, із <https://www.eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/rudi-titanu>.

Скільки титану в Україні. (2020). Отримано 22 травня 2022 року, із <https://www.dsnews.ua/ukr/economics/blagaya-vest-dlya-firtasha-zachem-kabmin-podnimaet-titanovuyu-otrasl-29092020-400803>.

Сумхінпро. (2022). Отримано 5 березня 2022 року, із <https://sumykhimprom.com.ua>.

Титан сьогодні. (2022). Отримано 02 травня 2022 року, із <https://velta-ua.com>.

ТОВ "Демуринський ГЗК". (2022). Отримано 02 травня 2022 року, із [https://demgok.com/index\\_ua.html](https://demgok.com/index_ua.html).

Хрущов, Д.П., Ковальчук, М.С., Ремезова, Е.А., Лаломов, А.В., Цымбал, С.Н., Босевская, Л.П., Лобасов, А.П., Ганжа, Е.А., Дулченко, Ю.В. (2017). Структурно-літологічне моделювання осадових формацій. Київ: Інтерсервіс.

Чого очікувати від приватизації ОГХК. (2021). Отримано 23 грудня 2021 року, із [https://biz.censor.net/columns/3292054/chogo\\_ochukuvati\\_vd\\_privatizats\\_oghk](https://biz.censor.net/columns/3292054/chogo_ochukuvati_vd_privatizats_oghk).

Adams, R. (2017). Informa Perth conference: assessing the need for new sources of TiO<sub>2</sub> and ZrSiO<sub>4</sub> raw materials. *Foc. Pigment.*, 9, 1-4.

Britt, A., Summerfield, A., Senior, D., Roberts, A., Kay, D., Hitchman, P., Champion, A., Huston, D., Simpson, D., Smith, R., Sexton, M., Schofield, A. (2016). Australia's Identified Mineral Resources 2016. Geoscience Australia, Canberra.

Bruckard, W. J., Pownceby, M. I., Smith, L. K., Sparrow, G. J. (2015). Review of processing conditions for Murray Basin ilmenite concentrates. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* (Trans. Inst. Min Metall. C), 124, 47-63.

Chi, H., Li, X., Zheng, Z. (2001). Littoral placer mineralization and prospectivity in Shandong province. *Shandong Geology*, 17, 24-31. [in Chinese]

Ganzha, E.A., Lalomov, A.V., Chefranov, A.V., Grigoreva, A.V., Magazina, L.O. (2019). Lithostructural geological-genetic model and mineral composition of the Krasnokutsk rare metal-titanium placer deposit (Ukraine). *Lithology and Mineral Resources*, 54(6), 465-479.

Komlev, O., Bortnyk, S., Remezova, O., Spysia, R., Vasylenko, S., Zhylykin, S. (2021). The use of data on the material composition of sediments during forecasting works of titanium root and placer deposits. *Geoinformatics*, 5, 11.

Liu, Q., Baker, P., Zhao, H. (2016). Titanium sponge production technology in China. In Venkatesh, V. et al. (Eds), *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium: The Minerals, Metals & Materials Society*, (pp. 177-182).

Meinhold, G. (2010). Rutile and its applications in earth sciences. *Earth-Sci. Rev.*, 102.

Mine production of titanium minerals worldwide. (2021). Retrieved January 10, 2020, from <https://www.statista.com/statistics/759972/mine-production-titanium-minerals-worldwide-by-country/>.

MINERAL COMMODITY SUMMARIES. (2022) Retrieved May 20, 2022, from <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>.

Mineral Commodity Summaries: Titanium Mineral Concentrates. (2021). US Geological Survey (USGS), Reston, Virginia, USA.

Mudd, G.M., Jowitt, S.M. (2016). Rare earth elements from heavy mineral sands: assessing the potential of a forgotten resource. *Appl. Earth Sci.*, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1080/03717453.2016.1194955>.

Perks, C., Mudd, G. (2019). Titanium, zirconium resources and production. A state of the art literature review. *Ore Geology Reviews*, 107, 629-646. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.025>.

Perks, C., Mudd, G. (2021). Soft rocks, hard rocks: the world's resources and reserves of Ti and Zr and associated critical minerals. *International Geology Review*. <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1904294>.

Pownceby, M.I. (2010). Alteration and associated impurity element enrichment in detrital ilmenites from the Murray Basin, southeast Australia: a product of multistage alteration. *Aust. J. Earth Sci.*, 57, 243-258.

Reyneke, L., Wallmach, T. (2007). Characterization of FeTi-oxide species occurring in the Ranobe heavy mineral deposit, Madagascar. *The 6th International Heavy Minerals Conference 'Back to Basics. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.

Van Gosen, B.S., Hou, B., Song, T. (2019). Heavy Mineral Sands Resources in China. In: Mineral deposits of China. (pp. 581-593). China: Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/sp.22.XX>.

## References

- Adams, R. (2017). Informa Perth conference: assessing the need for new sources of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZrSiO}_4$  raw materials. *Foc. Pigmen.*, 9, 1–4.
- Britt, A., Summerfield, A., Senior, D., Roberts, A., Kay, D., Hitchman, P., Champion, A., Huston, D., Simpson, D., Smith, R., Sexton, M., Schofield, A. (2016). Australia's Identified Mineral Resources 2016. Geoscience Australia, Canberra.
- Bruckard, W. J., Pownceby, M. I., Smith, L. K., Sparrow, G. J. (2015). Review of processing conditions for Murray Basin ilmenite concentrates. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* (Trans. Inst. Min Metall. C), 124, 47–63.
- Chi, H., Li, X., Zheng, Z. (2001). Littoral placer mineralization and prospectivity in Shandong province. *Shandong Geology*, 17, 24–31. [in Chinese]
- Data portal of the mining industry of Ukraine. (2022). Retrieved March 25, 2022, from <https://www.eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/ruditanu>. [in Ukrainian]
- "DEMURINSKY MINING AND PROCESSING PLANT" LLC. (2022). Retrieved May 02, 2022, from [https://demgok.com/index\\_ua.html](https://demgok.com/index_ua.html). [in Ukrainian]
- Galets'kyi, L.S., Remesova, O.O. (2007). International Conference "Ti 2007 in the CIS". *Geologist of Ukraine*, 1, 3–5. [in Ukrainian]
- Galets'kyi, L.S., Remesova, O.O. (2011). Strategy for the development of the titanium mineral resource base of Ukraine. *Geological journal*, 3, 66–72. [in Ukrainian]
- Galets'kyi, L.S. (2009). Stan ta perspektyvy rozvytku tytanovogo vyrobnytstva v Ukraini. *Research report*. Kyiv: Instytut geologichnykh nauk NAN Ukrainy. [in Ukrainian]
- Galets'kyi, L.S. (Ed.). (2001). Atlas "Geology and Minerals of Ukraine". Scale 1: 5 000 000. Kyiv: NAS of Ukraine, Ministry of Ecology and Natural Resources. [in Ukrainian]
- Ganzha, E.A., Lalomov, A.V., Chefranova, A.V., Grigoreva, A.V., Magazina, L.O. (2019). Lithostructural geological-genetic model and mineral composition of the Krasnokutsk rare metal–titanium placer deposit (Ukraine). *Lithology and Mineral Resources*, 54(6), 465–479.
- Ganzha, E.A., Okholina, T.V., Kroshko, Yu.V. (2019). Geological structure and ore-bearing capacity of the Zelenoyarsk titanium-zirconium deposit. *Collection of scientific works of UkrDGRI*, 3–4, 26–38. [in Russian]
- How much titanium in Ukraine. (2020). Retrieved May 22, 2022, from <https://www.dsnews.ua/ukr/economics/blagaya-vest-dlya-firtasha-zachemkabmin-podnimaet-titanovuyu-otrasl-29092020-400803>. [in Ukrainian]
- International group of the companies. (2022). Retrieved April 07, 2022, from <https://groupdf.com/uk/nash-biznes-2/titanovyyi-biznes/>. [in Ukrainian]
- Khrushchev, D.P., Kovalchuk, M.S., Remezova, E.A., Lalomov, A.V., Tsybal, S.N., Bosevskaya, L.P., Lobasov, A.P., Ganzha, E.A., Dudchenko, Yu.V. (2017). Structural and lithological modeling of sedimentary formations. Kyiv: Interservice. [in Russian]
- Komliev, O., Bortnyk, S., Remezova, O., Spyt'sia, R., Vasylenko, S., Zhylykin, S. (2021). The use of data on the material composition of sediments during forecasting works of titanium root and placer deposits. *Geoinformatics*, 5, 11.
- Liu, Q., Baker, P., Zhao, H. (2016). Titanium sponge production technology in China. In Venkatesh, V. et al. (Eds), *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium: The Minerals, Metals & Materials Society*, pp. 177–182.
- Map of special permits for subsoil use. DNVP "Geoinform of Ukraine". (2022). Retrieved February 3, 2022, from <https://minerals-ua.info>. [in Ukrainian]
- Meinhold, G. (2010). Rutile and its applications in earth sciences. *Earth-Sci. Rev.*, 102.
- Mine production of titanium minerals worldwide. (2021). Retrieved January 10, 2020, from <https://www.statista.com/statistics/759972/mine-production-titanium-minerals-worldwide-by-country/>
- MINERAL COMMODITY SUMMARIES. (2022) Retrieved May 20, 2022, from <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
- Mineral Commodity Summaries: Titanium Mineral Concentrates. (2021). US Geological Survey (USGS), Reston, Virginia, USA.
- Mineral resources of Ukraine. (2021). Retrieved April 4, 2022, from [https://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2021/11/m\\_r\\_2021.pdf](https://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2021/11/m_r_2021.pdf) [in Ukrainian]
- Mudd, G.M., Jowitt, S.M. (2016). Rare earth elements from heavy mineral sands: assessing the potential of a forgotten resource. *Appl. Earth Sci.*, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1080/03717453.2016.1194955>.
- Mykhailenko, O.G., Krasnikova, N.A. (2021). Competitiveness of Ukraine in the world market of mineral products. *Economics*, 7, 71–82. <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2021.7.71> [in Ukrainian]
- Perks, C., Mudd, G. (2019). Titanium, zirconium resources and production. A state of the art literature review. *Ore Geology Reviews*, 107, 629–646. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.025>.
- Perks, C., Mudd, G. (2021). Soft rocks, hard rocks: the world's resources and reserves of Ti and Zr and associated critical minerals. *International Geology Review*. <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1904294>.
- Pownceby, M.I. (2010). Alteration and associated impurity element enrichment in detrital ilmenites from the Murray Basin, southeast Australia: a product of multistage alteration. *Aust. J. Earth Sci.*, 57, 243–258.
- Reyneke, L., Wallmach, T. (2007). Characterization of FeTi-oxide species occurring in the Ranobe heavy mineral deposit, Madagascar. *The 6th International Heavy Minerals Conference 'Back to Basics. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Sumykhimprom. (2022). Retrieved March 5, 2022, from <https://sumykhimprom.com.ua>. [in Ukrainian]
- Titanium today. (2022). Retrieved May 02, 2022, from <https://velta-ua.com>. [in Ukrainian]
- UMCC. (2022). Retrieved April 10, 2022, from <https://www.umcc-titanium.com>. [in Ukrainian]
- Vadimov, N.T., Tymoshenko, O.D. (1958). Generalnii podschet zasobov titana i zirkoniia v peskah Samotkanskogo mestorozhdeniia. *Research report*. Verkhovtsevo. [in Russian]
- Van Gosen, B.S., Hou, B., Song, T. (2019). Heavy Mineral Sands Resources in China: In: Mineral deposits of China. (pp. 581–593). China: Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/sp.22.XX>.
- What to expect from privatization UMCC. (2021). Retrieved December 23, 2021, from [https://biz.censor.net/columns/3292054/chogo\\_ochkuvaty\\_vd\\_privatizats\\_oghk](https://biz.censor.net/columns/3292054/chogo_ochkuvaty_vd_privatizats_oghk). [in Ukrainian]
- Zaporozhye titanium-magnesium combine. (2022). Retrieved March 6, 2022, from <https://ztmc.zp.ua>. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 01.08.22

O. Ganzha, PhD (Geol.), Researcher,  
E-mail: [oag2909@gmail.com](mailto:oag2909@gmail.com);  
H. Kuzmanenko, PhD (Geol.), Researcher,  
E-mail: [geology7@ukr.net](mailto:geology7@ukr.net);  
T. Okholina, PhD (Geol.), Senior Researcher,  
E-mail: [svilya@ukr.net](mailto:svilya@ukr.net);  
O. Remezova, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,  
E-mail: [elena.titania2305@gmail.com](mailto:elena.titania2305@gmail.com);  
Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
55 b O. Honchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine

## CURRENT STATE OF MINERAL BASE OF TITANIUM DEPOSITS OF UKRAINE

*The current state of titanium deposits in the world and Ukraine's place in the world of titanium ore reserves are analyzed. The list of leading countries in terms of reserves of loose titanium-zirconium ores and the dynamics of production is given. There is no regularity of the ratio of countries in terms of reserves and countries in terms of production. A map of the countries to which Ukraine exports titanium raw materials and the dynamics of titanium dioxide prices over the past 5 years are presented. The list of available mining enterprises for enrichment and production of titanium products within Ukraine is given. The general characteristic of the mineral resource base of titanium of Ukraine with the map of the current state of ilmenite and complex zircon-ilmenite placers of the Ukrainian Placer Province is provided.*

**Keywords:** titanium deposits, titanium dioxide, complex zircon-ilmenite placers, Ukraine, reserves of minerals of the titanium group.

## ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК [556.3+556.552]-047.58:502.51(285):551.579.5(477.52)  
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.09>

О. Кошляков, д-р геол. наук, проф.,  
E-mail: kosh57@ukr.net;  
О. Диняк, канд. геол. наук, доц.,  
E-mail: oksdyn@ukr.net;  
Д. Чомко, канд. геол. наук, доц.,  
E-mail: dimath@ukr.net;  
І. Кошлякова, інж.,  
E-mail: irkos@ukr.net;

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

### ОЦІНЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОЇ СКЛАДОВОЇ ВОДНОГО БАЛАНСУ ОЗЕРА ЛЕБЕДИНЕ (СУМСЬКА ОБЛАСТЬ)

(представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О. І. Меньшовим та д-ром геогр. наук, проф. В. В. Гребнем)

Представлено кількісний аналіз зв'язку між поверхневими і підземними водами на території, прилеглій до озера Лебедине (Сумська область). Попередні дослідження не дають пояснення впливу та кількісної оцінки величини підземного стоку на коливання рівня озера. Авторами статті запропоновано розв'язання проблеми на основі розрахунку водного балансу. Наведено результати досліджень гідрогеологічних умов території поблизу озера та результати кількісного оцінювання підземної складової водного балансу. Установлено, що рівневий режим озера Лебедине обумовлений метеорологічними чинниками, рельєфом місцевості й умовами взаємозв'язку поверхневих і підземних (передусім ґрунтових) вод. Також установлено, що ґрунтові води в алювіальних відкладах на прилеглій до озера території відділені від водоносних горизонтів, що залягають нижче, потужним шаром водотривких гірських порід. Отже, тривала експлуатація згаданих водоносних горизонтів і комплексів з метою централізованого водопостачання не може бути безпосередньою причиною зміни природного водного балансу ґрунтових вод та озера. Також незначне антропогенне навантаження на прилеглій території не можна вважати чинником, що помітно впливає на природний водний баланс. Живлення ґрунтових вод на території досліджень відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів і перетікання поверхневих вод з озера у ґрунтові. Зміна рівня води в озері дуже швидко зумовлює зміну рівня води у ґрунтовому водоносному горизонті, і навпаки. За даними розрахунків, загальні втрати з озера на живлення ґрунтових вод становлять близько 207,1 м³/доба, або 75600 м³/рік. Отримані результати є основою для наукового обґрунтування проєктування системи локального моніторингу за станом ґрунтових вод на території, прилеглій до озера Лебедине.

**Ключові слова:** водний баланс, гідрогеологічна модель, взаємозв'язок між поверхневими і підземними водами, ґрунтові води, інфільтрація.

**Постановка проблеми.** Аналіз ситуації, що складається на водних об'єктах України впродовж останніх десятиліть, свідчить про подальше загострення проблеми забезпеченості водними ресурсами населення і галузей господарського комплексу. Період маловоддя, що триває на річках та озерах України вже близько десяти років, досягнув критичної межі у 2020 році, що стало наслідком поєднання кількох факторів: посушливої осені попереднього року, теплої, малосніжної зими та наступного дефіциту опадів у березні – квітні. Наслідком такої ситуації стала дуже низька водність більшості річок країни, що у квітні 2020 року досягла значень, більш характерних для середини – кінця літа (*Рішення РНБО України "Про стан водних ресурсів України", 2021*).

Міліють не лише річки, міліють і озера (широко освітлюється в засобах масової інформації проблема обміління перлини України – озера Світязь). Суттєво знижуються рівні води в колодязях і свердловинах, що викликає занепокоєність населення країни, переважно сільського, для якого колодязі є єдиним джерелом питного водопостачання. Проблема маловоддя торкнулася не тільки значних за розмірами водних об'єктів (таких як озеро Світязь або великі річки України).

Ситуація, що склалася, вимагає негайного розроблення і впровадження низки заходів, передбачити які має Водна стратегія України, розроблення якої ведуть провідні науково-дослідні установи країни. Проблема має комплексний характер і для розв'язання потребує

об'єднання зусиль державних органів влади, органів місцевого самоврядування та вчених.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема маловоддя впродовж останніх років на річках та озерах України торкнулася і озера Лебедине (м. Лебедин Сумської обл.). Останні інженерно-геологічні вишукування для поліпшення технічного стану та благоустрою озера проводилися у 2013 р. Їх результати представлено у звіті (*Хоруженко та ін., 2013*). З'ясування причин різкого обміління озера Лебедине із застосуванням водно-балансового методу міститься у статтях (*Lukianets and Grebin, 2020; Chomko et al., 2020; Лук'янець та Гребінь, 2021*). У цих роботах для об'єктивного оцінювання змін, що відбулися у водообміні озера, проведено порівняння складових водного балансу за два періоди – кліматичної норми (1961–1990 рр.) та сучасний (1991–2019 рр.) (табл. 1).

Для оз. Лебедине кількісні показники складових водного балансу нерівнозначні як усередині досліджуваних періодів, так і між ними. Автори згаданих публікацій вважають, що обміління озера – значною мірою природно обумовлений процес. У сучасний період спостерігається зменшення кількості атмосферних опадів і, як наслідок, схилового припливу води в озеро, а підвищення температури повітря обумовлює збільшення інтенсивності випаровування.

Проте до недавнього часу мало уваги було приділено визначенню фільтрації (підземного відтоку) з озера Лебедине. Метою статті є кількісне оцінювання фільтрації як складової водного балансу озера Лебедине.

Таблиця 1

Водний баланс оз. Лебедине (Lukianets and Grebin, 2020)

| Компоненти водного балансу озера, м³        |                                                          | Період, роки |           |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|-----------|
|                                             |                                                          | 1961–1990    | 1991–2019 |
| Компоненти надходження                      | приплив води із площі, прилеглої до озера (схилний стік) | 921500       | 760000    |
|                                             | атмосферні опади на дзеркало озера                       | 311480       | 274890    |
| Компоненти втрачання                        | випаровування із дзеркала озера і транспірація           | 1135250      | 1040490   |
|                                             | фільтрація (підземний відтік) з озера                    | 75600        | 75600     |
| Акумулятивна компонента об'єму води в озері |                                                          | +22130       | -81200    |

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення балансової складової фільтрації (підземного відтоку)  $V_f$  протягом року автори детально досліджували зв'язок між поверхневими водами озера Лебедине та ґрунтовими водами водоносного горизонту в алювіальних відкладах голоцену заплави річок, їхніх приток і днищ балок (аН).

Ґрунтові води горизонту залягають на глибинах від 3 до 6 м, рідше глибше (в деяких районах статичний рівень зафіксований на глибині 4,08–15,4 м). Водовміщуючі породи мають неоднорідний літологічний склад і мілинисті, здебільшого це піски різнозернисті, глинисті. Потужність водоносного горизонту коливається від 9,6 до 18,1 м. Нижнім водотривом є щільні породи кийської світи еоцену ( $P_2kv$ ) (Державна геологічна карта України, н.д.). За хімічним складом води горизонту сульфатно-гідрокарбонатні кальцієві та гідрокарбонатні магнієво-кальцієві із загальною мінералізацією до 0,33–0,53 г/дм³ і загальною твердістю від 3,75 до 5,62 ммоль/дм³. Характерним є підвищений вміст заліза до 1,64 мг/дм³ (ГДК – 0,3 г/дм³). Живлення ґрунтових вод горизонту відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів, перетікань із поверхневих водойм (зокрема озера Лебедине), а також за рахунок перетікання із нижчезалягаючих водоносних горизонтів у місцях дренажу останніх річками.

На території досліджень рівень ґрунтових вод фіксується в середньому на глибині 2,2 м від поверхні. Ґрунтові води відділені від водоносних горизонтів, що залягають нижче, потужним шаром водотривких гірських порід, тобто не мають між собою значущого гідравлічного зв'язку. Тому, на думку авторів статті, існуюча тривала експлуатація згаданих водоносних горизонтів і комплексів з метою водопостачання не може бути безпосередньою причиною значущої зміни природного водного балансу ґрунтових вод та озера.

За результатами опрацювання матеріалів фондів досліджень у геолого-гідрогеологічному розрізі району озера Лебедине виділяють чотири різні шари ґрунту (Хоруженко та ін., 2013):

1. Рослинний шар – пісок темно-сірий гумусований, малого ступеня водонасичення. Потужність шару до 0,3 м.
2. Пісок середньої крупності світло-сірий, жовтий, пухкий із прошарками середньої щільності, малого ступеня водонасичення, із прошарками супіску та суглинку 10–15 %. Потужність шару від 1,5 до 4,1 м.
3. Пісок мілкий сірий, світло-сірий, жовтий, пухкий із прошарками середньої щільності та піску пилуватого до 15 %, насичений водою, із включеннями гравію та гальки до 10 %, із прошарками супіску та суглинку 10–15 %. Потужність шару від 0,2 до 2,4 м.
4. Пісок мілкий сірий, світло-сірий, жовтий, щільний, вологий, черепашко-дитритове включення до 5 %, із прошарками супіску та суглинку 10–15 %. Потужність шару від 0,7 до 0,8 м.

За даними власних польових досліджень авторів у червні 2020 року та наявних фондів матеріалів, на прибережних ділянках озера було зазначено місця підповерхневого стоку вод атмосферних опадів в озеро. На

нижчих заплавах місцями ґрунтові води містяться дуже близько до денної поверхні й утворюють заболочені ділянки, але на час досліджень такі ділянки майже висохли. На віддаленні від озера рівні ґрунтових вод стають нижчими за рівень води в озері, вони зменшуються в усіх напрямках від озера (Хоруженко та ін., 2013): дзеркало ґрунтових вод розходить куполом від 123,5 м (рівень оз. Лебедине, позначка дна озера 122,2 м) до 122,1–122,2 м на північ, 122,0–122,1 м на південь, 121,8–122,0 м на схід та 121,2–122,2 м на захід (рис. 1).

Таке розташування рівнів поверхневих та ґрунтових вод свідчить про те, що між водами оз. Лебедине і ґрунтовими водами існує дуже тісний гідравлічний зв'язок. Зміна рівня води в озері швидко приводить до зміни рівня в ґрунтовому водоносному горизонті, і навпаки.

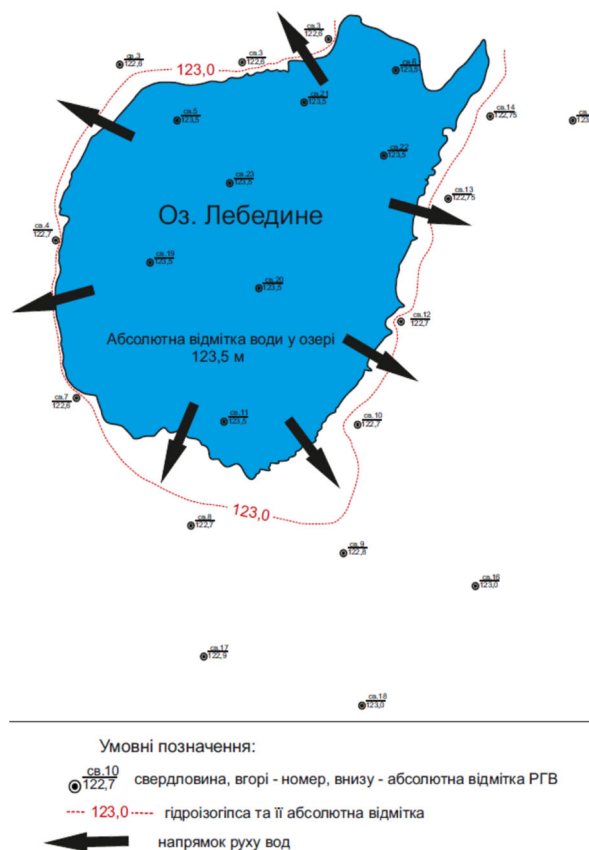


Рис. 1. Рівні ґрунтових вод поблизу оз. Лебедине

Слід зауважити, що результати наявних багаторічних регіональних гідрогеологічних спостережень (Прогноз рівнів ґрунтових вод на території України, 2008, 2010, 2011, 2018) по двох найближчих до озера Лебедине свердловинах (рис. 2) Державної моніторингової мережі не фіксують в останні роки суттєвих змін глибини залягання рівня ґрунтових вод на території (табл. 2).

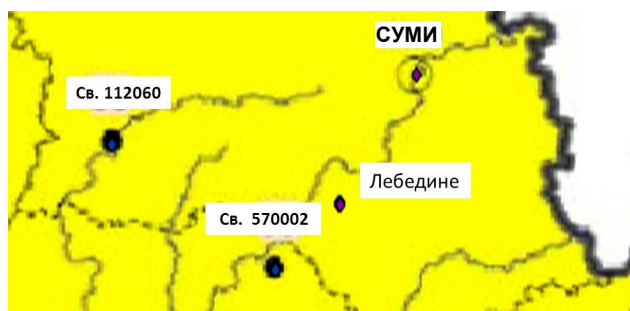


Рис. 2. Наявні режимні свердловини

З наведеного можна зробити висновок, що в регіональному плані суттєві зміни рівня ґрунтових вод не спостерігаються. Тому з позиції подальших кількісних розрахунків підземних втрат води з озера як складової загального водного балансу озеро Лебедине по всьому периметру слід вважати зоною живлення потоку ґрунтових вод, а незначне антропогенне навантаження на прилеглу до озера територію (передусім наявність колодязів та свердловин, що каптують ґрунтові води), за даними польових обстежень авторів, не може бути чинником, що помітно впливає на підземний відтік. Саме за таких умов авторами виконаний розрахунок підземного відтоку  $V_{\phi}$  з озера Лебедине.

Таблиця 2

Рівні ґрунтових вод у спостережних свердловинах

| №          | Середній багаторічний рівень ґрунтових вод від поверхні землі, м | Середньорічні фактичні рівні за рік, м |      |      |      |      |
|------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------|------|------|------|
|            |                                                                  | 2008                                   | 2010 | 2011 | 2018 | 2019 |
| Св. 112060 | 3,82                                                             | 3,97                                   | 3,93 | 3,80 | 3,78 | 3,74 |
| Св. 570002 | 2,18                                                             | 2,35                                   | 2,60 | 2,60 | 2,57 | 2,61 |

Загальна математична модель руху підземних вод у просторі описується рівнянням математичної фізики еліптичного або параболічного типу (Жернов, 1982; Гавич *и др.*, 1983). При розрахунках руху ґрунтових вод режим фільтрації вважають жорстким (зневажають деформацією гірської породи та рідини), а рівняння має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial H}{\partial z}) = 0, \quad (1)$$

де  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  – коефіцієнти фільтрації у напрямках осей координат.

Для практичного застосування моделі авторами виконано схематизацію умов геофільтрації відповідно до умов конкретного об'єкта розрахунків. У процесі виконаної схематизації можна виділити три послідовні етапи: створення природної гідрогеологічної моделі; створення геофільтраційної моделі; створення розрахункової математичної моделі (Гавич, 1980; Дробноход, 2008).

Природна гідрогеологічна модель була створена на основі інформації, що міститься в наявних фондових матеріалах і спеціальній науковій літературі (Хоруженко *та ін.*, 2013). Зокрема, це інформація про геологічну будову території, умови залягання і розповсюдження водоносних і слабопроникних шарів, основні джерела формування підземних вод, умови живлення і розвантаження підземних вод, гідрогеологічні параметри водоносних і слабопроникних шарів та закономірності їх зміни в плані та розрізі, умови взаємозв'язку підземних і поверхневих вод, умови інфільтрації атмосферних опадів, джерела живлення і розвантаження підземних вод тощо.

Далі природна модель перетворювалась на геофільтраційну, на якій реальна природна гідрогеологічна обстановка формалізувалась шляхом виділення основних чинників формування підземних вод. Потім на основі геофільтраційної моделі була створена розрахункова математична модель, що враховує режим фільтрації, кількість розрахункових шарів у розрізі, межі області фільтрації, крайові умови та розрахункові значення гідрогеологічних параметрів.

Оскільки природна гідрогеологічна модель є структурою, розміри якої у площині набагато перевищують потужність геологічних шарів, далі для розрахунків була використана модель планового потоку підземних вод (передумова Дюпюї) (Жернов, 1982).

Отже, базове рівняння (1) стосовно планового потоку ґрунтових вод має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot h \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \cdot h \frac{\partial H}{\partial y}) + W = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (2)$$

де  $h$  – потужність потоку ґрунтових вод;  $W$  – інтенсивність інфільтраційного живлення потоку;  $\mu$  – коефіцієнт гравітаційної водовіддачі гірської породи.

Відсутність даних режимних спостережень за рівнями ґрунтових вод та рівнем води в озері унеможливають на даний час використати модель неусталеного руху, тому автори використали модель усталеного руху потоку ґрунтових вод. У такому разі рівняння (2) перетворюється в наступне:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot h \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \cdot h \frac{\partial H}{\partial y}) + W = 0. \quad (3)$$

При подальшому корегуванні розрахункової математичної моделі автори виходили з того, що фактичний розрахунок втрат води з озера Лебедине на живлення ґрунтових вод (витрати потоку ґрунтових вод) можливо здійснити лише за течією, що відповідає наявним інженерно-геологічним розрізам (Хоруженко *та ін.*, 2013). Тому в підсумку була використана модель усталеного одновимірного потоку. При розрахунках таких потоків приймається, що ширина потоку дорівнює 1 м. Витрата потоку, ширина якого дорівнює 1 м, має назву питомої витрати і позначається як  $q$ . Розмірність питомої витрати –  $\text{м}^2/\text{доба}$ . Щоб отримати загальну величину витрати потоку ґрунтових вод  $Q$  (у  $\text{м}^3/\text{доба}$ ), необхідно осереднену питому витрату помножити на довжину берегової лінії озера.

При розгляді усталених одновимірних потоків зазвичай розрізняють три основні схеми їхньої будови: потік зі сталим коефіцієнтом водопровідності, однорідний безнапірний потік (схема Дюпюї), однорідно-шаруватий безнапірний потік (схема Гринського) (Жернов, 1982; Гавич *и др.*, 1983). Для обґрунтованого вибору схеми будови потоку було проаналізовано матеріали наявних інженерно-геологічних розрізів і результати лабораторних визначень властивостей ґрунтів (Хоруженко *та ін.*, 2013). За цими даними водонасичена товща складається із двох головних шарів. Зверху залягає шар пісків середньої крупності завтовшки 0,6–1,9 м, знизу – пісок дрібний завтовшки 1,8–3,0 м. Коефіцієнт пористості пісків нижнього шару змінюється від 0,39 до 0,472, середнє значення становить 0,427.

Оскільки відсутні фактичні дані про коефіцієнти фільтрації згаданих шарів, то коефіцієнти фільтрації були визначені за наявними даними фактичного літологічного опису порід і табл. 3.

Таблиця 3

Значення коефіцієнта фільтрації для різних порід (Стольберг та ін., 2000)

| Характеристика породи     | Коефіцієнт фільтрації, м/доба |
|---------------------------|-------------------------------|
| Глина                     | < 0,0001                      |
| Суглинок                  | 0,0001–0,0100                 |
| Супісок                   | 0,001–1,000                   |
| Пісок пилюватий           | 0,01–1,00                     |
| Пісок дрібний             | 0,1–10,0                      |
| Пісок середньої крупності | 1–10                          |
| Пісок крупний             | 10–100                        |
| Гравій, галька            | 100–10000                     |
| Нетріщинуваті породи      | 0,01                          |
| Слаботріщинуваті породи   | 0,01–10                       |
| Тріщинуваті породи        | 10–30                         |
| Дуже тріщинуваті породи   | 30–100                        |

Для подальших розрахунків використано такі коефіцієнти фільтрації: для верхнього шару  $K_1 = 1,0$  м/доба, для нижнього  $K_2 = 0,4$  м/доба.

Подальша схематизація вимагала зведення неоднорідної (двошарової) товщі до квазіоднорідної (одношарової). Для цього за умови невеликої кількості точок визначення параметрів зазвичай використовують емпіричний критерій у вигляді співвідношення коефіцієнтів фільтрації (Гавич, 1980):

$$\frac{K_1}{K_2} \leq 3 \dots 5. \quad (4)$$

Тоді за розрахункове приймають середньоарифметичне значення коефіцієнта фільтрації або використовують сумарну загальну водопровідність товщі.

У нашому випадку  $\frac{K_1}{K_2} = \frac{1,0}{0,4} = 2,5 \leq 3$ , тобто товщу можна вважати квазіоднорідною у фільтраційному сенсі. Тому для подальших розрахунків можна використати згадану раніше схему одновимірного потоку зі сталим коефіцієнтом водопровідності  $T$ , а саме таке рівняння:

$$\frac{d^2 H}{dx^2} + \frac{w}{T} = 0. \quad (5)$$

Розв'язки рівняння (5) відомі, вони наведені, наприклад, у (Жернов, 1982).

Для визначення гідродинамічного напору  $H_x$  у будь-якому перетині  $x$  (див. рис. 3) має вигляд

$$H_x = H_0 + \frac{H_L - H_0}{L} \cdot x + \frac{w \cdot x}{2 \cdot T} \cdot (L - x). \quad (6)$$

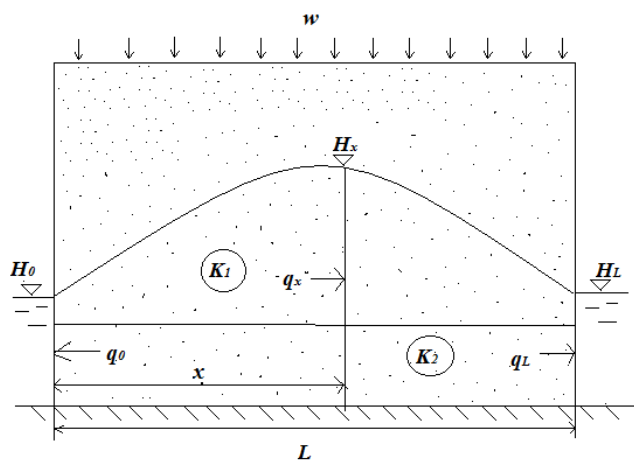


Рис. 3. Схема одновимірного потоку ґрунтових вод

Питома витрата потоку  $q_x$  у будь-якому перетині  $x$  визначається за залежністю

$$q_x = -T \cdot \frac{dH}{dx} = T \cdot \frac{H_0 - H_L}{L} - w \cdot (0,5 \cdot L - x). \quad (7)$$

Для витрат на межах потоків  $q_0$  і  $q_L$  маємо

$$\begin{aligned} q_0 &= T \cdot \frac{H_0 - H_L}{L} - \frac{w \cdot L}{2}; \\ q_L &= T \cdot \frac{H_0 - H_L}{L} + \frac{w \cdot L}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Якщо інфільтраційне живлення потоку (надходження води у потік по вертикалі) можна вважати несуттєвим ( $w \approx 0$ ), то відповідні рівняння матимуть вигляд

$$H_x = H_0 + \frac{H_L - H_0}{L} \cdot x; \quad q = q_0 = q_L = T \cdot \frac{H_0 - H_L}{L}. \quad (9)$$

Враховуючи малу відстань від озера до свердловин (від 14 до 79 м), інфільтраційне живлення потоку на ділянці розрахунків можна вважати несуттєвим ( $w \approx 0$ ). Тому питома втрата води з озера на живлення ґрунтових вод  $q$  (у м<sup>2</sup>/доба) визначалась саме за допомогою залежності (9). Тут  $H_0$  відповідає позначці рівня ґрунтових вод у свердловині, м;  $H_L$  – позначка рівня води в озері, м;  $L$  – відстань від озера до свердловини, м;  $T$  – сумарна загальна водопровідність товщі, м<sup>2</sup>/доба. Відповідна розрахункова схема наведена на рис. 4.

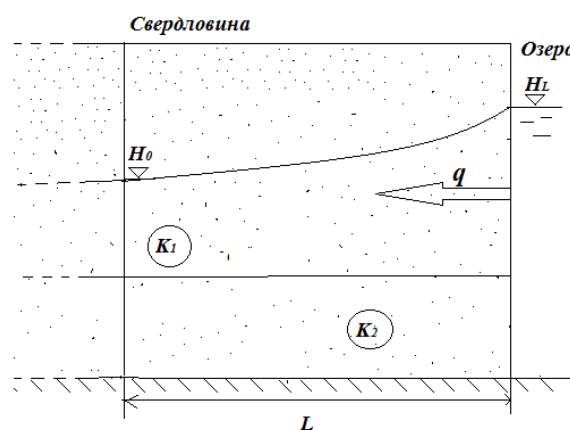


Рис. 4. Прийнята розрахункова схема одновимірного потоку ґрунтових вод для визначення питомої втрати води з озера

Результати розрахунків за залежністю (9) представлені в табл. 4.

Враховуючи величину периметра озера, за даними табл. 4 можна визначити імовірну величину підземного відтоку  $B_{\phi}$  (втрат води з озера Лебедине на живлення ґрунтових вод). Результати такого визначення наведені в табл. 5.

Таблиця 4

## Результати авторських розрахунків питомих втрат води з озера Лебедине

|                                           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Абс. відм. поверхні озера, м              | 123,50000 |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Розріз                                    | 1-1       | 1-1       | 2-2       | 2-2       | 3-3       | 4-4       | 4-4       | 5-5       | 5-5       |
| № св.                                     | 1         | 14        | 2         | 13        | 3         | 4         | 12        | 7         | 10        |
| Абс. відм. рівня у свердлов., м           | 122,10000 | 122,20000 | 122,00000 | 122,20000 | 122,00000 | 122,00000 | 121,60000 | 121,80000 | 122,10000 |
| Відстань від озера до свердловини, м      | 50,00000  | 50,00000  | 43,40000  | 78,90000  | 50,00000  | 61,50000  | 14,00000  | 61,60000  | 37,70000  |
| Напірний градієнт                         | 0,02800   | 0,02600   | 0,03456   | 0,01648   | 0,03000   | 0,02439   | 0,13571   | 0,02760   | 0,03714   |
| Коеф. фільтр. шару 1, м/д                 | 1,00000   | 1,00000   | 1,00000   | 1,00000   | 1,00000   | 1,00000   | 1,00000   | 1,00000   | 1,00000   |
| Абс. відм. підшови шару 1, м              | 120,50000 | 120,50000 | 120,50000 | 120,50000 | 119,80000 | 120,20000 | 121,00000 | 120,40000 | 120,20000 |
| Коеф. фільтр. шару 2, м/д                 | 0,40000   | 0,40000   | 0,40000   | 0,40000   | 0,40000   | 0,40000   | 0,40000   | 0,40000   | 0,40000   |
| Абс. відм. підшови шару 2, м              | 118,00000 | 118,00000 | 118,00000 | 118,00000 | 118,00000 | 118,00000 | 118,00000 | 118,00000 | 118,00000 |
| Коеф. водопровідності шару 1, кв.м/д      | 1,60000   | 1,70000   | 1,50000   | 1,70000   | 2,20000   | 1,80000   | 0,60000   | 1,40000   | 1,90000   |
| Коеф. водопровідності шару 2, кв.м/д      | 1,00000   | 1,00000   | 1,00000   | 1,00000   | 0,72000   | 0,88000   | 1,20000   | 0,96000   | 0,88000   |
| Коеф. водопровідності сумарний, кв.м/д    | 2,60000   | 2,70000   | 2,50000   | 2,70000   | 2,92000   | 2,68000   | 1,80000   | 2,36000   | 2,78000   |
| Питома витрата потоку, кв.м/д             | 0,07280   | 0,07020   | 0,08641   | 0,04449   | 0,08760   | 0,06537   | 0,24429   | 0,06513   | 0,10324   |
| Питома витрата потоку середня, кв.м/д     |           |           |           |           |           |           |           |           | 0,83951   |
| Питома витрата потоку мінімальна, кв.м/д  |           |           |           |           |           |           |           |           | 0,04449   |
| Питома витрата потоку максимальна, кв.м/д |           |           |           |           |           |           |           |           | 0,24429   |
| Питома витрата потоку імовірна, кв.м/д    |           |           |           |           |           |           |           |           | 0,07868   |

Таблиця 5

Результати визначення величини підземного відтоку  $V_p$ 

|                                                    |       |
|----------------------------------------------------|-------|
| Периметр озера, м                                  | 2632  |
| Підземний відтік імовірний, у м <sup>3</sup> /доба | 207,1 |
| Підземний відтік імовірний, у м <sup>3</sup> /рік  | 75600 |

**Висновки.** Установлено, що рівневий режим озера Лебедине обумовлений метеорологічними чинниками, рельєфом місцевості й умовами взаємозв'язку поверхневих і підземних (передусім ґрунтових) вод. Авторами статті детально досліджений зв'язок поверхневих і підземних вод на території, прилеглої до озера Лебедине.

Аналіз наявної геолого-гідрогеологічної інформації свідчить про те, що ґрунтові води в алювіальних відкладах на прилеглої до озера території відділені від водоносних горизонтів, що залягають нижче, потужним шаром водотривких гірських порід, тобто вони не мають між собою значущого гідралічного зв'язку. Тому тривала експлуатація згаданих водоносних горизонтів і комплексів із метою централізованого водопостачання не може бути безпосередньою причиною зміни природного водного балансу ґрунтових вод та озера. Також незначне антропогенне навантаження на прилеглої території (наявність колодязів і свердловин, що каптують ґрунтові води) не можна вважати чинником, що помітно впливає на природний водний баланс озера.

Живлення ґрунтових вод на території досліджень відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів і перетікання поверхневих вод з озера у ґрунті. Наявність згаданого перетікання підтверджується тим, що рівень ґрунтових вод відповідно до отриманих позначок навкруги озера зменшується в усіх напрямках. Така конфігурація гідроізогіпс свідчить про те, що між озером і ґрунтовими водами існує дуже тісний гідралічний зв'язок. Зміна рівня води в озері дуже швидко зумовлює зміну рівня води в ґрунтовому водоносному горизонті, і навпаки. Отже, озеро Лебедине по всьому його периметру є зоною живлення потоку ґрунтових вод.

Авторами виконано розрахунок втрат води з озера Лебедине на живлення ґрунтових вод (підземного відтоку) за течією, результати наведено у табл. 4. Загальні втрати з озера на живлення ґрунтових вод становлять близько 207,1 м<sup>3</sup>/доба, або 75600 м<sup>3</sup>/рік.

Отримані результати є основою для наукового обґрунтування проектування системи локального моніторингу за станом ґрунтових вод на території, прилеглої до озера Лебедине.

## Список використаних джерел

- Гавич, І.К. (1980). Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М.: Недра, 358.
- Гавич, І.К., Ковалевский, В.С., Язвин, Л.С. и др. (1983). Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 241.
- Державна геологічна карта України (масштаб 1:200 000). (н.д.). Отримано з <http://geoinf.kiev.ua/>
- Дробноход, М.І. (2008). Оцінка запасів підземних вод. К.: ВПЦ "Київський університет", 384.
- Жернов, І.Е. (1982). Динамика подземных вод. К.: Вища школа, 324.
- Лук'янець, О.І., Гребін, В.В. (2021). Часова динаміка водно-балансових складових в басейні р. Псел. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 1(59), 28-36. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.3>.
- Рішення РНБО України "Про стан водних ресурсів України" від 30 липня 2021 року. (2021). Отримано з <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0049525-21#Text>
- Стольберг, Ф.В., Ладыженский, В.Н. и др. (2000). Экология города. К.: Либра, 464.
- Хоруженко, Ю.В. та ін. (2013). Поліпшення технічного стану та благоустрою озера Лебедине в м. Лебедин. *Технічний звіт за результатами інженерно-геологічних вишукувань*. К., ТОВ "Укргеоінвест Консалтинг", 40.
- Прогноз рівнів ґрунтових вод на території України на 2008 рік. (2008). Держ. служба геології та надр України, ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України". Відп. за вип. Н.Г. Пишна. К.: Б.в., 42.
- Прогноз рівнів ґрунтових вод на території України на 2010 рік. (2010). Держ. служба геології та надр України, ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України". Відп. за вип. Н.Г. Пишна. К.: Б.в., 41.
- Прогноз рівнів ґрунтових вод на території України на 2011 рік. (2011). Держ. служба геології та надр України, ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України". Відп. за вип. Н.Г. Пишна. К.: Б.в., 39.
- Прогноз рівнів ґрунтових вод України на 2018-2019. (2018). Отримано з <http://geoinf.kiev.ua/publikatsiyi/prognoz-rivniv-gruntovix-vod/>
- Chomko, D., Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I. (2020). Determination of the underground component of the water balance of lake Lebedyne (Sumy region) in the context of prospects for the restoration of its water constitution and the project. *XIV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 10-13 November 2020, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056092>
- Lukianets, O., Grebin, V. (2020). Water balance of lake Lebedyne in modern climatic conditions. *Conference Proceedings. XIV International Scientific Conference on "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 10-13 November 2020, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056026.6>

## References

- Chomko, D., Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I. (2020). Determination of the underground component of the water balance of lake Lebedyne (Sumy region) in the context of prospects for the restoration of its water constitution and the project. *XIV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 10-13 November 2020, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056092>
- Decision of the National Security and Defense Council of Ukraine "On the state of water resources of Ukraine" of July 30, 2021. (2021). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0049525-21#Text>
- Drobnokhod, M.I. (2008). Assessment of groundwater reserves. K.: PPCenter "Kyiv University", 384. [in Russian]
- Gavich, I.K. (1980). Theory and practice of applying modeling to hydrogeology. M. Nedra, 358. [in Russian]
- Gavich, I.K., Kovalevsky, V.S., Yazvin, L.S. et al. (1983). Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics. Novosibirsk: Nayka, 241. [in Russian]
- Khoruzhenko, Yu., V. et al. (2013). Improving the technical condition and improvement of Lake Lebedyne in Lebedyn. *Technical report on the results of engineering and geological surveys*. K., LLC "Ukrgeoinvest Consulting", 40. [in Ukrainian]
- Lukianets, O.I., Grebin, V.V. (2021). Time dynamics of water balance components in the Psel river basin Hydrology. *Hydrochemistry and Hydroecology*, 1(59), 28-36. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.3> [in Ukrainian]
- Lukianets, O., Grebin, V. (2020). Water balance of lake Lebedyne in modern climatic conditions. Conference Proceedings. *XIV International Scientific Conference on "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 10-13 November 2020, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056026.6> [in Ukrainian]
- State Geological Map of Ukraine (scale 1:200 000). (n.d.). Retrieved from <http://geoinf.kiev.ua/> [in Ukrainian]
- Stolberg, F.V., Ladyzhensky, V.N. et al. (2000). Ecology of the City. K.: Libra, 464. [in Russian]
- Zhernov, I.E. (1982). Dynamics of groundwater. K.: Vyscha shkola, 324. [in Russian]
- Forecast of groundwater levels of Ukraine for 2008. (2008). State Service of Geology and Subsoil of Ukraine. DNVP "GEOINFORM UKRAINE" Resp. for vip. N.H. Pyshna. K., 42. [in Ukrainian]
- Forecast of groundwater levels of Ukraine for 2010. (2010). State Service of Geology and Subsoil of Ukraine. DNVP "GEOINFORM UKRAINE" Resp. for vip. N.H. Pyshna. K., 41. [in Ukrainian]
- Forecast of groundwater levels of Ukraine for 2011. (2011). State Service of Geology and Subsoil of Ukraine. DNVP "GEOINFORM UKRAINE" Resp. for vip. N.H. Pyshna. K., 39. [in Ukrainian]
- Forecast of groundwater levels of Ukraine for 2018-2019. DNVP "GEOINFORM UKRAINE". (2018). Retrieved from <http://geoinf.kiev.ua/publikatsiyi/prognoz-rivniv-gruntovix-vod/> [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 19.04.22

O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), prof., Head of the Department,  
E-mail: kosh57@ukr.net;  
O. Dyniak, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,  
E-mail: oksdyn @ukr.net;  
D. Chomko, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,  
E-mail: dimath@ukr.net;  
I. Koshliakova, Engineer,  
E-mail: irkos@ukr.net;  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,  
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

## ASSESSMENT OF THE FILTRATION COMPONENT OF THE WATER BALANCE OF LEBEDYNE LAKE (SUMY REGION)

*Quantitative analysis of the relationship between surface and groundwater in the area adjacent to Lebedyne Lake (Sumy region) is presented. Preliminary studies do not explain the role and quantification of groundwater runoff in lake level fluctuations. The solution to the problem is proposed by the authors based on the calculation of water balance. The article presents the results of research of hydrogeological conditions of the territory near the lake and the results of quantitative assessment of the underground component of the water balance. It has been established that the level regime of Lebedyne Lake is determined by meteorological factors, terrain and conditions of interconnection of surface and groundwater (primarily groundwater). It was also found that groundwater in alluvial deposits in the area adjacent to the lake is separated from the aquifers below, a thick layer of waterproof rocks. Therefore, the existing long-term operation of the mentioned aquifers and complexes for the purpose of centralized water supply cannot be a direct cause of changes in the natural water balance of groundwater and lakes. Also, low anthropogenic pressure in the surrounding area cannot be considered a factor that significantly affects the natural water balance. Groundwater supply in the study area is due to infiltration of precipitation and the flow of surface water from the lake into the groundwater. Changing the water level in the lake very quickly leads to a change in the water level in the soil aquifer, and vice versa. According to calculations, the total loss from the lake to groundwater supply is about 207.1 m<sup>3</sup>/day or 75600 m<sup>3</sup>/year. The obtained results are the basis for scientific substantiation of designing a system of local monitoring of groundwater status in the area adjacent to Lebedyne Lake.*

**Keywords:** water balance, hydrogeological model, relationship between surface and groundwater, groundwater, infiltration.

УДК 551.49

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.10>

Н. Люта, канд. геол.-мінералог. наук,

E-mail: [nljuta@ur.net](mailto:nljuta@ur.net);Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;

І. Саніна,

E-mail: [ekogeol@ukr.net](mailto:ekogeol@ukr.net);ВП УкрГРІ ДП "Українська геологічна компанія",  
вул. Автозаводська, 78-А, м. Київ, 04114, Київ, Україна

## УМОВИ ФОРМУВАННЯ ЯКІСНОГО СТАНУ ВОДОНОСНИХ ГОРИЗОНТІВ У БАСЕЙНІ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ

*(представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О. Є. Кошляковим)*

Україна впроваджує правила інтегрованого управління водними ресурсами, передбачені Водною рамковою директивою ЄС, за басейновим принципом. Річкові басейни розглядаються як цілісні багатокomпонентні системи, для них розробляються плани управління, що містять аналіз існуючого стану водних ресурсів і заходи з поліпшення стану поверхневих і підземних вод. Отже, особливого значення набуває об'єктивне оцінювання поточного стану підземних вод і врахування умов їхнього формування. Метою статті є аналіз природних і антропогенних умов формування підземних вод у межах басейну Південного Бугу. Басейн Південного Бугу площею 63 700 км<sup>2</sup> є єдиним річковим басейном I порядку, цілком розташованим у межах України, на території семи адміністративних областей. Зважаючи на різноманітність структурно-геологічних і фізико-географічних умов різних частин басейну, ресурси підземних вод розподілені нерівномірно. У статті проаналізовано природні умови формування ресурсів підземних вод, їхня захищеність від забруднення, зміни якості підземних вод основних водонесних горизонтів у процесі експлуатації водозаборів. Стисло охарактеризовано антропогенне навантаження, оцінено існуючий стан підземних вод і його зміни у просторі й часі. Установлено пріоритетність природних чинників у формуванні якісного стану підземних вод.

**Ключові слова:** Південний Буг, басейн, водонесні горизонти, стан підземних вод, мінералізація.

**Постановка проблеми.** Приймаючи європейський вектор розвитку, Україна уклала Угоду про асоціацію нашої країни з ЄС і підписала низку документів, серед яких виняткове значення має Водна рамкова директива ЄС (ВРД), оскільки водні ресурси в європейському законодавстві є однією з найбільш жорстко регульованих сфер. Основним принципом ВРД є басейновий, який передбачає визнання річкового басейну як цілісного багатокomпонентного об'єкта, для якого розробляється план управління, що містить аналіз існуючого стану водних ресурсів і заходи з поліпшення стану поверхневих і підземних вод. У цьому контексті особливого значення набуває об'єктивне оцінювання поточного стану підземних вод і врахування умов їхнього формування, природних і антропогенних чинників, що обумовлюють зміни їхнього стану.

**Аналіз публікацій за темою досліджень.** Розроблення Плану управління річковим басейном Південного Бугу, аналіз стану та визначення першочергових заходів було виконане колективом авторів (*Афанасьєв та ін., 2014*) за підтримки Шведського агентства міжнародного розвитку (SIDA) та Шведського агентства з охорони довкілля (SEPA) у 2014 році, але перелік зазначених питань стосувався виключно поверхневої гідросфери. Низка питань є спільними для поверхневих і підземних вод, тому результати зазначеної роботи були враховані у процесі підготовки цієї статті. Чинники формування якісного стану підземних вод досліджувалися у низці публікацій, однак головна увага при цьому приділялася висвітленню результатів прецизійних досліджень у межах впливу порівняно обмежених за площею територій або окремих водозаборів (*Кошлякова, 2014; Колябіна та ін., 2021*).

**Метою цієї статті** є аналіз природних і антропогенних умов формування підземних вод у межах басейну Південного Бугу, який буде використаний у процесі організації та проведення моніторингу підземних вод за басейновим принципом.

**Аналіз природних умов формування ресурсів підземних вод.** Басейн Південного Бугу площею 63 700 км<sup>2</sup> – це єдиний річковий басейн I порядку, цілком розташований у межах України, на території семи

адміністративних областей. Найбільші частини площі басейну припадають на Вінницьку (25,7 %), Кіровоградську (24,2 %), Миколаївську (23,2 %) і Черкаську (13,2 %) області, значно менші частини розташовані у межах Одеської, Хмельницької та Київської областей.

Велика площа басейну обумовлює його неоднорідні природні умови. Геологічна будова території басейну Південного Бугу визначається його розташуванням у межах Східноєвропейської платформи, де основними геологічними структурами першого порядку є Український щит, Волино-Подільська плита та Південноукраїнська монокліналь. Відповідно до структурно-геологічної будови на території басейну Південного Бугу виділяють три гідрогеологічні регіони першого порядку із притаманними їм регіональними закономірностями формування гідрогеологічних умов: Волино-Подільський артезіанський басейн (ВПАБ), Гідрогеологічну область Українського щита (ГОУЩ) та Причорноморський артезіанський басейн (ПРАБ).

Геоморфологічно басейн приурочений до трьох областей: верхня частина лежить на Подільській височині, середня – на Придніпровській височині, нижня – на Причорноморській низовині. У межах Подільської та Придніпровської височин рельєф рівнинний – це сильно розчленоване плато із глибоко врізаними (до 150 м) річковими долинами. Причорноморська низовина вирізняється пласким рельєфом із середнім ступенем розчленованості річковими долинами (*Афанасьєв та ін., 2014*).

Територія басейну Південного Бугу лежить у межах лісостепової і степової фізико-географічних зон. У верхів'ї та середній частині басейну клімат помірно континентальний. Клімат південних районів перебуває під впливом Чорного моря і в нижній течії річки повільно переходить у посушливий. Значна протяжність території басейну з північного заходу на південний схід обумовлює суттєві відмінності у розподілі температури повітря – середня річна температура змінюється від 7,1 до 10,0 °С. Річна норма опадів у лісостеповій частині басейну становить у середньому 669 мм, у степовій – 470–540 мм (*Афанасьєв та ін., 2014*). Отже, північна і центральна частини басейну

© Люта Н., Саніна І., 2022

належать до зони нестійкого зволоження, а південна – до недостатнього зволоження, що визначає відповідні умови інфільтраційного живлення підземних вод.

Зважаючи на різноманіття структурно-геологічних та фізико-географічних умов різних частин басейну, ресурси підземних вод у його межах розподілені нерівномірно. Сприятливими умовами формування ресурсів підземних вод характеризується північно-західна частина території у межах ВПАБ, що обумовлено геолого-структурною будовою і кліматичними чинниками. Північна, центральна і східна частини території, приурочені до ГОУЩ, мають обмежені ресурси. У південній частині, у межах ПраБ, умови формування ресурсів підземних

вод складні, що пояснюється як кліматичними чинниками, так і фаціальною та літологічною мінливістю водовмісних порід, які обумовлюють строкатість якісного складу підземних вод.

**Захищеність підземних вод.** Важливою умовою формування хорошого якісного стану підземних вод є їхня захищеність від забруднення з поверхні, яка оцінюється за потужністю і літологічним складом зони аерації. За цими показниками перші від поверхні водоносні горизонти на території басейну Південного Бугу є незахищеними і різняться лише часом проникнення забруднення через зону аерації. У північній частині басейну цей час становить 50–250 діб, а у південній – понад 3000 діб (рис. 1).

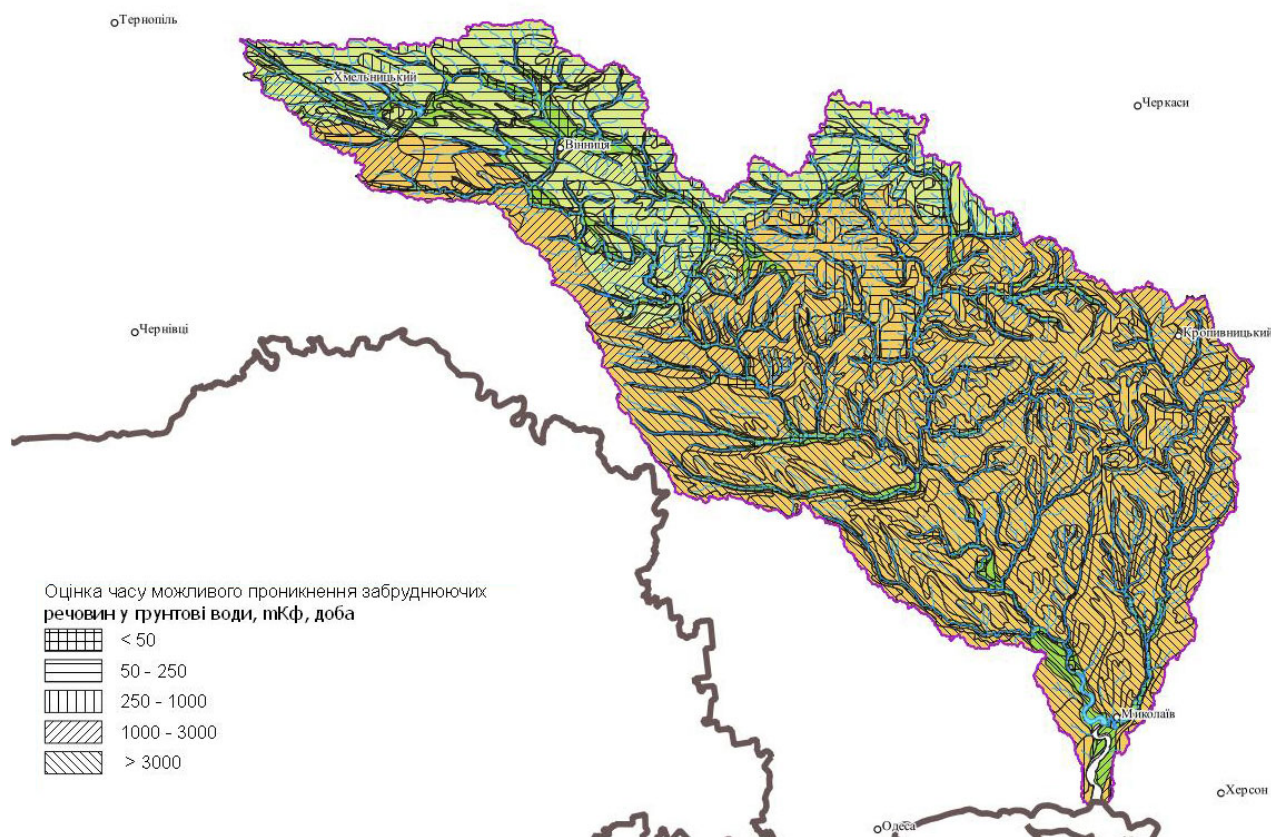


Рис. 1. Оцінка часу можливого проникнення забруднюючих речовин у ґрунтові води

Неоднакові умови захищеності властиві й напірним водоносним горизонтам. На рис. 2 представлено результати оцінювання захищеності перших від поверхні напірних водоносних горизонтів, які використовуються для централізованого водопостачання. Загалом у басейні Південного Бугу переважають захищені водоносні горизонти (37 %), умовно захищені становлять близько 35 %, а незахищені – 28 % від його загальної площі.

Слід зауважити, що умови захищеності перших від поверхні основних напірних водоносних горизонтів у межах різних гідрогеологічних регіонів басейну Південного Бугу різняться. Наприклад, у межах ВПАБ переважають захищені водоносні горизонти у породах неогену, крейди та докембрію, у їхній покрівлі залягають слабопроникні глинисті породи потужністю понад 10 м. Частка захищених, неуразливих до забруднення водоносних горизонтів тут становить 68 %. У річкових долинах поширені умовно захищені водоносні горизонти (16 % території), у покрівлі яких залягають слабопроникні відклади потужністю від

3 до 10 м, а також незахищені (16 %), потужність слабопроникних відкладів у покрівлі яких менша ніж 3 м (рис. 2, 3).

Схожі умови властиві території в межах ПраБ. Тут переважають захищені водоносні горизонти у відкладах неогену та крейди, площа яких становить 47 % від площі ПраБ, що лежить у басейні Південного Бугу. У долині Південного Бугу з притоками, де водотривки розмиті, водоносні горизонти в неогенових відкладах незахищені – їхня площа становить 31 %. На схилах річкових долин потужність слабопроникних відкладів коливається від 3 до 10 м, тому тут горизонти умовно захищені (22 %).

У ГОУЩ умови захищеності дещо гірші. Тут переважають умовно захищені водоносні горизонти (38 %). Площа незахищених, найбільш уразливих до забруднення, становить 28 %. Захищені водоносні горизонти тяжіють до вододілів, де поширені слабопроникні глинисті породи, і становлять 33 % від загальної площі цього гідрогеологічного регіону.

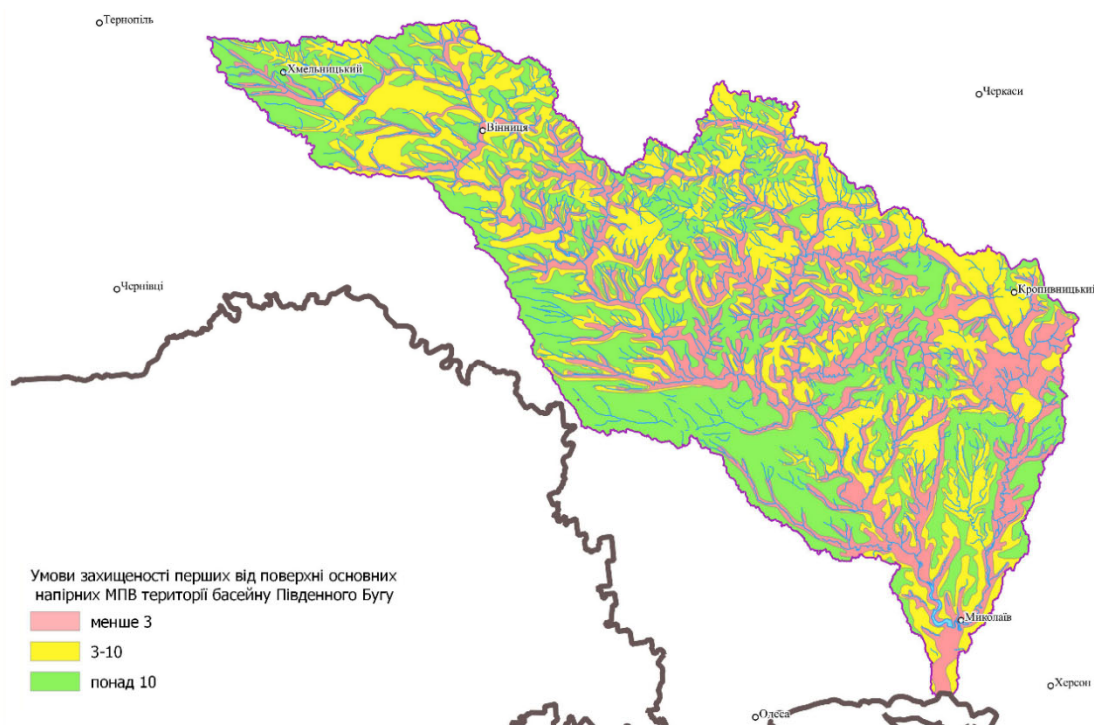


Рис. 2. Умови захищеності перших від поверхні основних водоносних горизонтів

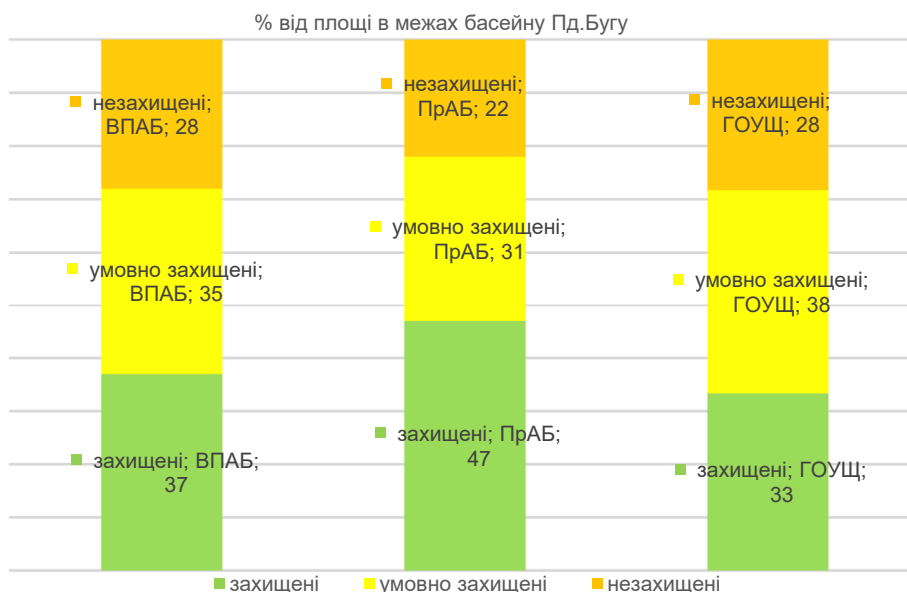


Рис. 3. Захищеність перших від поверхні водоносних горизонтів у межах різних гідрогеологічних регіонів у басейні Південного Бугу

**Антропогенне навантаження на підземні води.** У долині Південного Бугу з притоками розташовані крупні населені пункти: Хмельницький, Вінниця, Миколаїв, Кропивницький, Ладижин, Гайворон, Вознесенськ, Нова Одеса, Южноукраїнськ та ін. Закономірно, що основний обсяг промислового виробництва тут тягнє безпосередньо до річки та її приток.

За даними Регіональних доповідей про стан навколишнього природного середовища Хмельницької, Київської, Черкаської, Вінницької, Кіровоградської, Одеської та Миколаївської областей за 2018–2020 роки, у межах басейну Південного Бугу розміщені 83 крупні підприємства, які здійснюють значне навантаження на довкілля. Серед них 1 АЕС, 2 ТЕС, 4 ТЕЦ, 22 комунальні підприємства, 5 об'єктів газової, 11 – харчової, 3 – будівельної, 3 –

машинобудівної промисловості тощо. До основних галузей промислового виробництва у басейні Південного Бугу належать енергетика, газова, гірничодобувна, гірничозбагачувальна, металургійна, машинобудівна, фармацевтична, харчова промисловість, комунальне та сільське господарство. Максимальне навантаження зафіксоване в межах адміністративних областей з високим рівнем розвитку промисловості. Найбільша кількість твердих відходів утворюється в Миколаївській, Київській, Вінницькій областях. Щодо стічних вод, то їхня максимальна кількість припадає на Київську й Одеську області, викидів в атмосферу – на Вінницьку, Київську, Одеську. За переліченими показниками максимальне сукупне навантаження від точкових джерел властиве Київській та Хмельницькій областям, дещо менше – Миколаївській та

Вінницькій, найменше – Черкаській, Кіровоградській та Одеській. Порівняно з іншими регіонами України, антропогенне навантаження на досліджуваній території є середнім. Наприклад, одним із показників антропогенного впливу на довкілля є рівень забруднення донних відкладів річок басейну Південного Бугу, який, за даними регіональних досліджень, є невисоким. Середній вміст забруднювальних речовин – важких металів у донних відкладах досліджуваної території – переважно не перевищує фоновий більше ніж у два рази (Lyuta, 2021).

На території басейну Південного Бугу переважають землі сільськогосподарського використання, де інтенсивно застосовуються добрива та засоби захисту рослин. Таке забруднення є розосередженим (дифузним). Щороку на поля території басейну Південного Бугу вносять понад 9500 тис. ц мінеральних добрив у перерахунку на 100 % поживних речовин, близько 9 тис. т пестицидів. Площі, на які вносяться засоби хімізації, зважаючи на структуру земельного фонду басейну, де частка ріллі сягає 70 %, значні. Циркуляція токсичних речовин, що надходять із засобами хімізації у ґрунт, призводить до забруднення порід зони аерації та підземних вод.

Максимальне навантаження від дифузних джерел забруднення за кількістю внесених добрив і засобів хімізації на площі сільськогосподарського призначення спостерігається у Київській області, дещо менше – у Черкаській, ще менше у Вінницькій, Хмельницькій областях; мінімальне – у Кіровоградській, Миколаївській, Одеській.

Основною проблемою якості підземних вод є забруднення ґрунтових вод нітратами в межах агроландшафтів, яка є особливо гострою, зважаючи на недостатню захищеність низки основних водоносних горизонтів.

Оцінюючи антропогенне навантаження в басейні, слід згадати, що в 2000 році у межиріччі річок Південного Бугу і Синюхи територія п'яти сіл – Болеславчик, Чаусове-1, Чаусове-2, Мічуріне та Підгір'я Первомайського району Миколаївської області – Указом Президента України була оголошена зоною надзвичайної екологічної ситуації. Підставою для цього було масове захворювання значної кількості мешканців району на токсикодермію нез'ясованої етіології. Проведений комплекс досліджень засвідчив, що, найімовірніше, захворювання було пов'язане з короткотерміновим впливом додаткового негативного чинника (згодом – потрапляння у верхню частину геологічного середовища компонентів ракетного палива) на тлі високого рівня нітратного забруднення ґрунтових вод, які

використовувалися місцевим населенням для індивідуального водопостачання (Lyuta, 2003).

Слід зазначити, що забруднення підземних вод компонентами добрив та отрутохімікатів є надзвичайно важливою проблемою, зважаючи на зростаючу потребу в продовольстві й інтенсивний розвиток сільськогосподарського виробництва на території басейну Південного Бугу, що обумовлює неминуче зростання антропогенного навантаження від згаданих дифузних джерел забруднення у майбутньому.

**Стан підземних вод та оцінювання його змін.** Враховуючи складність і неоднорідність природних фізико-географічних умов і геологічної будови, а також антропогенного навантаження на території басейну Південного Бугу, очевидно, що якісний стан водоносних горизонтів відзначається значним різноманіттям. Крім того, зазначаються різні тенденції змін якості підземних вод у процесі експлуатації водозаборів.

**Перші від поверхні водоносні горизонти** приурочені до болотних, алювіальних, водно-льодовикових, а також еолово-делювіальних відкладів четвертинного віку. Живляться перші від поверхні водоносні горизонти на всій площі свого поширення, їхній кількісний стан ґрунтових вод визначається природними чинниками: атмосферними опадами та поверхневими водами. Антропогенний вплив на їхній кількісний стан зазвичай мінімальний, оскільки вони експлуатуються окремими індивідуальними водоспоживачами в сільській місцевості. Винятком є лише окремі випадки цільового осушення боліт.

Водночас якісний стан ґрунтових вод зазнає відчутних змін. Оскільки вони є незахищеними за природними показниками, то зазнають впливу від антропогенних джерел забруднення. Вплив точкових джерел забруднення на ґрунтові води виявляється у формуванні локальних аномалій, хімічний склад яких визначається специфікою джерел забруднення. Однак набагато більш характерний вплив дифузних джерел забруднення, що призводить до масштабного погіршення якості ґрунтових вод, – у межах агроландшафтів зазначається повсюдне забруднення нітратами, подекуди фіксуються аномалії пестицидів та нафтопродуктів.

Крім того, досить складною є природна гідрохімічна обстановка, тому якісний склад ґрунтових вод відзначається підвищеним вмістом хімічних елементів і сполук як природного, так і антропогенного походження (табл. 1).

Таблиця 1

Показники та речовини, вміст яких перевищує нормативні показники у ґрунтових водах басейну Південного Бугу

| № | Водоносні горизонти                                                | Показники та речовини, вміст яких перевищує нормативні показники |                           |
|---|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|   |                                                                    | Природного походження                                            | Антропогенного походження |
| 1 | У болотних четвертинних відкладах                                  | Залізо та органічні речовини                                     | Сполуки азоту             |
| 2 | В алювіальних четвертинних відкладах                               | Мінералізація                                                    | Сполуки азоту             |
| 3 | У водно-льодовикових та еолово-делювіальних четвертинних відкладах | Мінералізація, сульфати, хлориди, натрій                         | Сполуки азоту             |
| 4 | В еолово-делювіальних четвертинних відкладах                       | Мінералізація, сульфати, хлориди, натрій                         | Сполуки азоту             |

**Стан підземних вод міжпластових водоносних горизонтів.** Гідрогеохімічні характеристики підземних вод значною мірою обумовлені гідродинамічними умовами, тому кількісний і якісний стан підземних вод є взаємопов'язаними. У межах басейну Південного Бугу підземні води широко використовуються для господарсько-питних потреб, хоча, як і скрізь в Україні, тут спостерігається стійка тенденція до зменшення водоспоживання впродовж останніх десятиріч. На території басейну на родовищах підземних вод видобувається 36,028 тис. м<sup>3</sup>/д підземних вод. Також тут працює близько 500 водозаборів підземних вод із продуктивністю понад 10 м<sup>3</sup>/д із

сумарним водовідбором підземних вод 79,598 тис. м<sup>3</sup>/д. Разом з тим ступінь використання прогнозних ресурсів підземних вод (ПРПВ) у різних частинах території басейну відрізняється, у південній частині басейну він суттєво вищий. Загалом у басейні Південного Бугу видобувається 115,84 тис. м<sup>3</sup>/д води, що становить лише 6,14 % від загальної суми ПРПВ. Видобуток із затверджених експлуатаційних запасів підземних вод становить 36,273 тис. м<sup>3</sup>/д, видобуток водозаборів, які працюють на незатверджених запасах, – 79,598 тис. м<sup>3</sup>/д, що, відповідно, дорівнює 1,92 і 4,22 % від загальної суми ПРПВ (Стан підземних вод, 2021) (рис. 4).

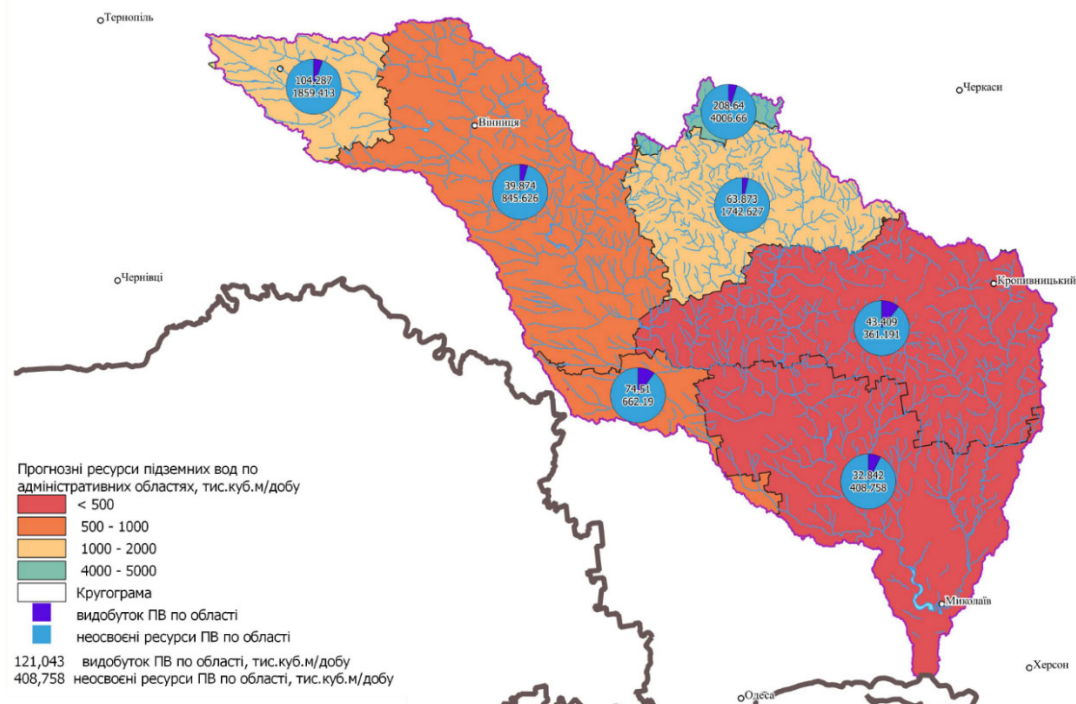


Рис. 4. Прогнозні ресурси підземних вод та їхнє використання (по адміністративних областях), тис. м<sup>3</sup>/д

Хімічний склад міжпластових водоносних горизонтів, що використовуються для централізованого водопостачання, у межах басейну Південного Бугу відзначається значним розмаїттям. Про це свідчать дані "Державного балансу корисних копалин України. Питні підземні води" за 2016 і 2020 рр. (Державний баланс, 2017, 2021), які містять інформацію про початкові (на час початку експлуатації водозабору) мінералізацію та макрокомпонентний склад підземних вод, а також ті самі дані станом на поточний рік, що дає змогу приблизно оцінити спрямованість і характер змін якості підземних вод.

У межах **Хмельницької області** водозабори експлуатують водоносні горизонти у неогенових, крейдових, вендських і протерозойських породах. Переважаючий склад води гідрокарбонатний магнієво-кальцієвий, мінералізація 0,5–0,7 г/дм<sup>3</sup>. При цьому в більшості водозаборів, дані про які наявні у "Державному балансі", зміни якості підземних вод не зафіксовані. Лише у воді окремих водозаборів, що експлуатують водоносні горизонти у вендських і протерозойських породах, відзначено незначне підвищення у хімічному складі ролі сульфатів і натрію.

На території **Київської області** водозабори експлуатують водоносний горизонт у тріщинуватій зоні порід архею-протерозою, хімічний склад води гідрокарбонатний магнієво-кальцієвий, мінералізація 0,3–0,5 г/дм<sup>3</sup>, зміни якості води не зафіксовані.

У межах **Вінницької області** водозабори експлуатують водоносні горизонти у сарматських вапняках N<sub>1s</sub> і у тріщинуватих гранітах архею і протерозою. Макрокомпонентний склад води в **неогенових відкладах** на початку експлуатації водозаборів майже скрізь у межах області був гідрокарбонатний магнієво-кальцієвий, мінералізація становила від 0,2 до 0,8 г/дм<sup>3</sup>. За період експлуатації, який коливається від 30 до 80, і навіть 120 років, відзначено збільшення мінералізації за рахунок вмісту хлоридів і сульфатів. Наприклад, на водозаборі у м. Бар мінералізація води з 1940 року збільшилася удвічі – з 0,45 до 0,93 г/дм<sup>3</sup>.

Хімічний склад води водоносного горизонту зони тріщинуватості **кристалічних порід** також переважно гідрокарбонатний магнієво-кальцієвий, лише на території м. Вінниці у воді водозаборів, експлуатація яких розпочалася у 2009 р., початковий хімічний склад був хлоридно-гідрокарбонатний магнієво-кальцієвий. Упродовж експлуатації водозаборів у більшості з них спостерігалися незначні зміни хімічного складу, що проявилися у збільшенні ролі хлоридів, сульфатів, натрію, магнію і, подекуди, у незначному підвищенні мінералізації.

У межах **Черкаської області** водозабори експлуатують МПВ у тріщинуватій зоні **кристалічних порід** (гранітів, мігматитів, гнейсів) архею-протерозою. Води практично повсюдно гідрокарбонатні кальцієво-магнієві, з мінералізацією 0,3–0,7 г/дм<sup>3</sup>. Лише в межах найбільш віддаленого від р. Південний Буг Катеринопільського району (нині Звенигородського) у воді окремих водозаборів мінералізація вища – 0,7–1,5 г/дм<sup>3</sup>, а у межах Манківського району (нині Уманського) трапляється вода хлоридно-сульфатного магнієво-кальцієвого складу з мінералізацією до 0,9 г/дм<sup>3</sup>.

На території **Кіровоградської області** експлуатаційні водозабори видобувають воду з різновікових утворень – четвертинних, буцацьких і сеноманських пісків, а також гранітів і гнейсів архею-протерозою. Хімічний склад підземних вод строкатий: водоносний горизонт у четвертинних відкладах характеризується сульфатно-гідрокарбонатним кальцієво-магнієво-натрієвим складом; у буцацьких пісках – гідрокарбонатним натрієво-кальцієво-магнієвим складом; у сеноманських пісках – гідрокарбонатно-сульфатним натрієво-кальцієво-магнієвим складом; у тріщинуватій зоні кристалічних порід – переважно гідрокарбонатним натрієво-кальцієвим і кальцієво-магнієво-натрієвим складом.

Зміни якості води впродовж експлуатації водозаборів у межах Кіровоградської та Черкаської областей не розглядаються через відсутність відповідної інформації у "Державному балансі".

У воді водозаборів на території **Одеської області**, які експлуатують водоносні горизонти у **неогенових вапняках**, за період експлуатації як із 70-х, так і з 90-х років минулого сторіччя №152 відзначено зміни первинного гідрокарбонатного кальцієво-магнієвого і магнієвого хімічного складу на гідрокарбонатний натрієво-магнієвий, практично без змін загальної мінералізації.

У пониззі Південного Бугу, в межах **Миколаївської області**, природний макрокомпонентний склад підземних вод стає ще більш неоднорідним. У складі підземних вод різновікових утворень збільшується роль хлоридіону. Так, у воді водоносного горизонту в четвертинних гравійних відкладах макрокомпонентний склад води сульфатно-хлоридно-гідрокарбонатний натрієво-магнієво-кальцієвий. Водоносний горизонт у сарматських вапняках характеризується переважно хлоридно-натрієвим, хлоридно-сульфатним магнієво-натрієвим складом, а в еоценових пісках – гідрокарбонатно-хлоридним натрієвим. Макрокомпонентний склад водоносного горизонту у крейдяних відкладах верхньої крейди хлоридно-гідрокарбонатний натрієвий. Водоносний горизонт у тріщинуватих гнейсах архею-протерозою має хлоридно-сульфатно-гідрокарбонатний кальцієво-магнієво-натрієвий склад. Мінералізація змінюється у широких межах, при цьому як мінімальна, так і максимальна мінералізація підземних вод зафіксована у водоносному горизонті у сарматських вапняках, максимум відзначено на Миколаївському родовищі (ділянка Сандора, св. №5) – 3,8–4,9 на початку експлуатації у 2001 році і до 5,3 г/дм<sup>3</sup> у поточному періоді. Загалом зміни якості підземних вод у процесі експлуатації тут зафіксовані у воді двох третин водозаборів, вони виявилися переважно у незначному

збільшенні загальної мінералізації за рахунок хлоридів, натрію та сульфатів.

Отже, аналіз даних "Державного балансу корисних копалин України. Питні підземні води" за 2016–2020 рр. засвідчив значне розмаїття природного макрокомпонентного складу підземних вод. У північній частині території басейну хімічний склад води основних водоносних горизонтів гідрокарбонатний магнієво-кальцієвий. У центральній частині території басейну до перелічених компонентів додаються сульфати і натрій, а у південній – хлориди. У напрямку з півночі на південь загалом збільшується мінералізація підземних вод.

Так, основний і найбільш поширений у басейні Південного Бугу водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних порід архею-протерозою на півночі характеризується мінералізацією 0,3–0,5 г/дм<sup>3</sup>, а на півдні території басейну – 0,6–1,5 г/дм<sup>3</sup>. Отже, хімічний склад підземних вод у тріщинуватій зоні порід архею-протерозою підпорядковується природній горизонтальній гідрогеохімічній зональності, що засвідчує тісний зв'язок цього водоносного горизонту з поверхневими і ґрунтовими водами.

Аналіз якості підземних вод також засвідчує, що 122 водозабори у 3 областях (Миколаївська, Одеська та Кіровоградська) у басейні Південного Бугу працюють у складних гідрогеохімічних умовах. Найбільш крупні водозабори наведено на рис. 5. При цьому на більшості з них невідповідність до нормативів за показником мінералізації обумовлена природними чинниками, пов'язаними зі складом водовмісних порід і специфічними гідрогеохімічними умовами формування підземних вод, і підтверджується відсутністю кореляції підвищеного вмісту компонентів хімічного складу з антропогенним навантаженням.

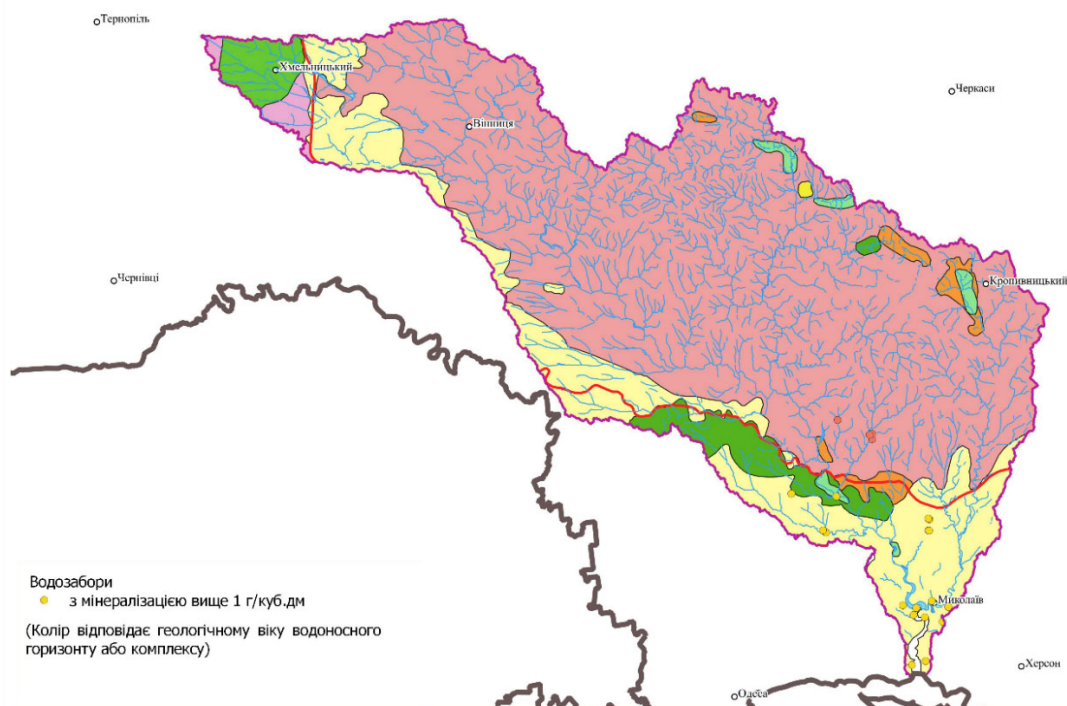


Рис. 5. Крупні водозабори підземних вод, що працюють у складних гідрогеохімічних умовах

Всього у басейні Південного Бугу видобувається 12 402 м<sup>3</sup>/д води із мінералізацією, що перевищує 1 г/дм<sup>3</sup>, у тому числі у межах Причорноморського артезіанського басейну – 9 926 м<sup>3</sup>/д, а в межах гідрогеологічної області Українського щита – 2 476 м<sup>3</sup>/д. Максимальний водовідбір води із підвищеною мінералізацією здійснюється із

відкладів неогену – 8 956 м<sup>3</sup>/д, із водоносного горизонту в зоні тріщинуватості порід архею-протерозою – 2 732 м<sup>3</sup>/д, із відкладів четвертинної системи – 587 м<sup>3</sup>/д, із відкладів палеогену – 127 м<sup>3</sup>/д.

Абсолютна більшість таких водозаборів розміщена в Миколаївській області, переважно в межах Причорноморського

артезіанського басейну, де водовмісні породи представлені неогеновими вапняками, меншою мірою – відкладами палеогену і четвертинної системи, а також у межах гідрогеологічної області Українського щита, у тріщинуватих породах архео-протерозою. Мінералізація води цих водозаборів нерідко перевищує  $1,5 \text{ г/дм}^3$ , сягаючи подекуди  $3,5\text{--}4,0 \text{ г/дм}^3$ , і обумовлена підвищеним вмістом натрію, сульфатів і хлоридів. Перевищення нормативних показників потребує обов'язкової водопідготовки перед подаванням води споживачам для питних цілей.

Порівняння початкових і поточних мінералізацій та хімічного складу підземних вод експлуатаційних водозаборів дозволяє дійти висновків щодо просторово-часових тенденцій змін якості води. Найменше зміни цих показників виявилися у північній частині басейну, що пояснюється комплексом природних і антропогенних чинників. У середній і південній частинах басейну зміни якості виявилися у незначному збільшенні мінералізації за рахунок підвищення ролі у хімічному складі води хлоридів, натрію, сульфатів. Джерела цих сполук можуть бути як антропогенними, так і природними, що має бути уточнено спеціальними дослідженнями у процесі моніторингу.

### Висновки

1. Територія басейну Південного Бугу відзначається складними і неоднорідними природними й антропогенними умовами формування підземних вод, що визначає регіональні відмінності їхнього кількісного та якісного стану.

2. Незважаючи на тривалий антропогенний вплив, визначальними чинниками формування кількісного та якісного стану (у частині дослідженого макрокомпонентного складу) міжпластових водоносних горизонтів є природні. Це підтверджується меншими показниками мінералізації і стабільністю показників хімічного складу підземних вод експлуатаційних водозаборів у північній частині басейну, розташованій у межах ВПАБ.

3. Найбільш поширений на території басейну водоносний горизонт у тріщинуватій зоні порід архео-протерозою відзначається чіткою горизонтальною гідрохімічною зональністю, що переконливо засвідчує його зв'язок із ґрунтовими водами, а отже – недостатньою (умовною) захищеністю від забруднення з поверхні.

4. Антропогенний вплив від точкових джерел забруднення має локальний характер у межах населених пунктів і стосується переважно перших від поверхні водоносних горизонтів. Водночас вплив дифузних джерел виявляється у

повсюдному забрудненні ґрунтових вод сполуками азоту, подекуди – пестицидами і нафтопродуктами.

5. Установлені особливості формування підземних вод основних водоносних горизонтів, зазначені зміни якості води під час експлуатації водозаборів, розміщених у басейні Південного Бугу, обумовлюють необхідність детального вивчення хімічного складу води у процесі моніторингу.

### Список використаних джерел

- Державний баланс корисних копалин України. (2017). Питні підземні води". ДНВП "Геоінформ України".
- Державний баланс корисних копалин України. (2021). Питні підземні води". ДНВП "Геоінформ України".
- Колябіна, І.Л., Шестопапов, В.М., Кастельцева, Н.Б. (2021). Механізми формування хімічного складу питних підземних вод Київського родовища (на прикладі водозабору "Оболонь"). *Геологічний журнал*, 2, 24–46.
- Кошлякова, Т.О. (2011). Зміни хімічного складу питних підземних вод м. Києва в процесі експлуатації. *Зб. наук. пр. ІГН НАН України*, 4, 84–89.
- Люта, Н.Г. (2003). Розроблення системи моніторингу геохімічного стану ландшафтів України для його оцінки та підготовки першочергових заходів у разі виникнення екологічно небезпечних ситуацій. *Звіт УкрДГРІ*. К. С. 63–73, 102–124.
- Стан підземних вод. (2021). Щорічник. Київ: Державна служба геології та надр України, ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України", 124 с.
- Lyuta, N. (2021). Regional features of heavy metals distribution in bottom sediments and surface water within river basins in Ukraine. *Abstract of 20-th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, Kiev, 2021, Ukraine*.

### References

- Kolyabina, I.L., Shestopalov, V.M., Kasteltseva, N.B. (2021) Chemical composition of drinking groundwater of Kyiv deposit formation mechanisms (on the example of Obolon water intake). *Geological Journal*, 2, 24–46. [in Ukrainian]
- Koshlyakova, T.O. (2011) Changes in the chemical composition of drinking groundwater in Kyiv during operation. *Coll. Science. etc. IGS NAS of Ukraine*, 4, 84–89. [in Ukrainian]
- Lyuta, N. (2021). Regional features of heavy metals distribution in bottom sediments and surface water within river basins in Ukraine. *Abstract of 20-th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, Kiev, 2021, Ukraine*.
- Lyuta, N.G. (2003). Development of system for monitoring the geochemical condition of the landscapes of Ukraine for its assessment and preparation of priority measures in case of environmentally hazardous situations. *UkrSGRI Report*. K. P. 63–73, 102–124. [in Ukrainian]
- State balance of minerals of Ukraine. (2017). Drinking groundwater. SSPE "Geoinform of Ukraine". [in Ukrainian]
- State balance of minerals of Ukraine. (2021). Drinking groundwater. SSPE "Geoinform of Ukraine". [in Ukrainian]
- State of groundwater. (2021). Yearbook – Kyiv: State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, State Information Geological Fund of Ukraine, 124 p. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 03.03.22

N. Lyuta, PhD (Geol.),  
E-mail: nlyuta@ukr.net;  
Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
Institute of Geology, 90 Vasykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;  
I. Sanina,  
E-mail: ekogeol@ukr.net;  
SD UkrGRI SE "Ukrainian geological company",  
78-A Avtozavodska Str., Kyiv, 04114, Ukraine

## CONDITIONS FOR THE FORMATION OF AQUIFERS QUALITATIVE STATE IN THE SOUTHERN BUG RIVER BASIN

Ukraine implements the principles of integrated water resources management according to the basin principle as stipulated by the EU Water Framework Directive. River basins are considered as integral multi-component systems and management plans are developed for them, which contain analysis of water resources existing state and measures for achievement of good condition of surface and groundwaters. Therefore, an objective assessment of the current state of groundwater and consideration of the conditions of its formation becomes particularly important. The purpose of this article is the analysis of natural and anthropogenic conditions of groundwater formation within the Southern Bug basin. Southern Bug basin with the area of 63 700 km<sup>2</sup> is the only river basin of the I order, which is completely located within Ukraine, on the territory of seven administrative regions. Due to the diversity of structural-geological and physical-geographical conditions of different parts of the basin, groundwater resources are distributed unevenly. The natural conditions of groundwater resources formation, their protection from pollution are analyzed and anthropogenic pressure is briefly characterized. The existing state of groundwater and its changes in space and time are evaluated. Changes in the quality of groundwater of the principle aquifers during the water intakes operation have been analyzed. The priority of natural factors in the formation of groundwater qualitative state has been established. The research results will be used during groundwater monitoring in the territory of the Southern Bug basin.

Keywords: Southern Bug, basin, aquifers, groundwater status, salinity.

UDC 556.314:556.388+504.064:556.38  
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.11>

S. Levoniuk, Senior Researcher,  
E-mail: [sergii.levonyuk@gmail.com](mailto:sergii.levonyuk@gmail.com);  
JSC Ukrgasvydobuvannya, 26/28 Kudriavska Str., Kyiv, 02000, Ukraine;  
I. Udalov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,  
E-mail: [igorudalov8@gmail.com](mailto:igorudalov8@gmail.com);  
V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

## DEVELOPMENT OF MEASURES TO INCREASE THE ECOLOGICAL SAFETY OF DRINKING WATER SUPPLY FOR POPULATION OF EASTERN UKRAINE DUE TO THE USE OF BUCHAK-KANIV AQUIFER GROUNDWATER

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

*In the article, measures to increase the ecological safety of population drinking water supply due to the use of Buchak-Kaniv aquifer groundwater from urban water intakes in Eastern Ukraine have been developed.*

*The ecological consequences of man-made intervention in Buchak-Kaniv aquifer drinking groundwater at the research territory have been assessed. The main pollutant elements of these groundwater have been traced. Water intakes (Poltava, Karlivka, Krasnograd, Lubny, Khorol, Reshetylivka), where the ecological consequences of technogenic intervention in the underground hydrosphere are the greatest, since here the target groundwater is partially or completely unsuitable for drinking purposes, have been identified. The key role of technogenesis (intensification of groundwater withdrawal and expansion of water intakes network; as a result – changes in the hydrodynamic conditions of operational aquifers and formation of their regional depression funnels) in these processes has been established. It is emphasized that the increased content of investigated pollutant elements in systematically consumed drinking water has a colossal effect on the human body, which can be expressed in a number of serious diseases.*

*In the paper, measures have been developed to minimize the established ecological consequences of technogenesis of Buchak-Kaniv aquifer drinking groundwater to increase the ecological safety of population drinking water supply from the Poltava city agglomeration water intakes, which are strategically important for the studied region. The system of groundwater hydrogeochemical monitoring at the region water intakes has been improved for the conditions of filtration of pollutants from the surface or their migration from below in the zones affected by tectonic faults associated with salt diapirs. This significantly shortens the time and reduces the cost of works in comparison with a full complex of hydrogeochemical studies within the entire territory. The allocation of promising areas for the construction of new water intakes to solve the problem of drinking groundwater lack of acceptable quality within the research territory has been substantiated. Estimated resources of high-quality drinking groundwater in a radius of 40 km around the Poltava city, the involvement of which will allow providing high-quality drinking water to the population of this urban agglomeration. The optimal general water withdrawal at the Poltava water intakes to stabilize the content of polluting elements in the composition of Buchak-Kaniv aquifer groundwater within different parts of the city has been justified.*

**Keywords:** groundwater, pollution, environmental safety, water intakes, measures.

**Statement of the problem.** Creating conditions for reliable safety of people's lives and activities in terms of providing the population with high-quality drinking water is one of priority environmental problems for Ukraine. It is especially acute in the eastern regions of the country, where under the complex influence of significant man-made pressure on the geological environment (GE) and natural factors, significant quality and resource changes of surface and drinking groundwater are observed.

Currently, almost 80% of the country's drinking water supply is provided by the use of surface water. At the same time, according to the degree of pollution, most water objects are classified as polluted and highly polluted, and the technogenic pressure on them is only increasing.

Therefore, in order to increase the ecological safety of population drinking water supply, it is very important to switch to a wider use of groundwater, as the only current source of naturally high-quality drinking water.

One of the main sources of drinking water supply for settlements in Eastern Ukraine is the waters of Buchak-Kaniv aquifer (BKA), which historically have been noted for their high drinking quality and stable chemical composition. However, BKA is locally vulnerable to both man-made and natural pollution. Against the background of modern technogenesis and natural processes, the chemical composition of these groundwaters has recently undergone significant changes. Currently, these waters are partially or completely unsuitable for drinking purposes at about 20 powerful urban water intakes in the region.

The above-mentioned features determine the need to conduct a complex of geoecological studies aimed at finding and developing optimal forms of managing the ecological

safety of drinking water supply in the studied region in modern geological and technogenic conditions.

**Analysis of previous studies and publications.** The papers of such outstanding scientists as A. L. Bryks (1983, 2013), E. S. Dzektsler (1993), M. S. Ohniansky (1985, 2013), N. K. Paramonov (2013), I. V. Udalov (2012, 2015, 2018), O. A. Ulytskyi (1998), E. O. Yakovlev (1994, 1998, 2001), O. N. Yartseva (1974), N. Dalla Libera (2017), A. Molinari (2019), E. Preziosi (2014) were directed to the development of methodology for studying the geological environment and, in particular, ecological-hydrogeological studies of drinking groundwater under the influence of active technogenesis (Aziz et al., 2015; Dalla Libera et al., 2017; Kononenko et al., 2018; Molinari et al., 2019; Ohniansky, 1985; Preziosi et al., 2014; Yakovlev et al., 1994; Yakovlev et al., 2001). The main principles of their research are basic for modern developments in this direction.

Problems related to the development of measures to improve the ecological safety of drinking water supply and stabilize the quality of groundwater at existing and prospective water intakes in various regions of the world were dealt with F. M. Bochever (1972, 1979), N. N. Verygyn (1979), V. M. Goldberg (1976, 1984, 1987), S. R. Krainov (1973, 1991), N. N. Lapshin (1979), M. S. Ohniansky (1985), A. E. Oradovska (1979, 1987), M. I. Plotnikov (1983, 1989), V. S. Sarkisian (1975), I. V. Udalov (2014, 2017, 2018), V. M. Shestakov (1973), V. V. Yakovlev (2008, 2016, 2018), M. Abtahi (2015), Y. Chen (2018), S. Nurani Zulkifli (2018), J. Szabo (2014), Y. Weiwu (2016) and some others.

These studies consider the methods of groundwater hydrogeochemical monitoring; methodology for assessing the quality of groundwaters in the conditions of their long-

term exploitation is highlighted; measures of minimizing the ecological consequences of man-made intervention in the underground hydrosphere are developed.

In the papers of O. O. Serdiukova, V. I. Smoliar, G. I. Petrasenko, E. A. Nazarenko, Yu. B. Nikoziat, O. D. Ivashchenko, O. I. Popov, L. V. Podrigalo, G. N. Danylenko, N. G. Semko and others (Levoniuk, 2019; Nazarenko et al., 2015; Popov et al., 2000; Serdiukova, 2013; Smoliar et al., 2007) an assessment of ecological consequences of man-made intervention in the underground hydrosphere within the studied territory was carried out. Some aspects of impact of drinking groundwater polluting elements on the formation of centers of population non-infectious diseases within this region were investigated.

**The purpose of article** is the development of measures to increase the ecological safety of population drinking water supply within Eastern Ukraine due to the use of Buchak-Kaniv aquifer groundwaters.

In order to achieve this purpose, the **following tasks** were supposed to be solved:

- to assess the ecological consequences of man-made intervention in the BKA drinking groundwater;
- to develop measures for minimizing these environmental consequences.

**Research results and their discussion.** The authors investigated the general ecological condition of BKA groundwater at large water intakes of Eastern Ukraine during the period of GE active technogenesis (1960–2020). In the process of studies, the main groundwater pollutant elements, which have systematically increased over standards (DSanPiN 2.2.4-171-10, 2010) values at the investigated water intakes, were traced. They are organized into 2 groups:

- elements-pollutants of surface genesis ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ), which are not characterized by a wide distribution (detected only at 3 large water intakes, such as Poltava, Khorol, Krasnograd);

- elements-pollutants of deep genesis ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+\text{K}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Fe}_{\text{total}}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{J}^-$ , as a result – increased water mineralization). It was established that these pollutants are the predominant factor in the deterioration of target groundwater quality, as they were detected in most of the large water intakes within studied region (including Poltava, Karlivka, Kotelva, Dykanka, Opishnya, Zinkiv, Gadyach, Pyryatyn, Chornukhy, Shyshaky, Lohvytsia, Myrhorod, Khorol, Lubny, Velyka Bagachka, Reshetylivka, Chutove, Krasnograd, Bogoduhiv and some other less powerful).

The following pollutant elements are most prevalent at the above-mentioned water intakes:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Fe}_{\text{total}}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{J}^-$ . On the basis of this, the authors classified them as elements-indicators of quality composition transformation of BKA waters. It was determined that these components are characterized by a gradual increase in their content in the process of active exploitation of region's powerful water intakes. Also, authors in previous papers (Levoniuk et al., 2018; Udalov et al., 2019) established the key role of technogenesis (intensification of groundwater withdrawal and expansion of water intakes network; as a result, changes in the hydrodynamic conditions of operational aquifers and the formation of their regional depression funnels) in these processes. At the same time, "thanking" to the man-made factor, as well as the tectonic and geological conditions of this territory, deep hydrogeomigration processes were activated (upward migration of substandard waters through tectonic faults associated with salt diapirs to the waters of active water exchange zone).

According to the papers (Levoniuk, 2019; Nazarenko et al., 2015; Popov et al., 2000; Serdiukova, 2013; Smoliar et al., 2007), the increased content of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Fe}_{\text{total}}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{J}^-$  in drinking water has a colossal effect on the human body. This can be expressed in a number of serious diseases of population that systematically consumes this water (Table 1).

Table 1

**The influence of increased content of studied hydrogeochemical indicators on the human body**  
(compiled by the author on the basis of (Levoniuk, 2019; Nazarenko et al., 2015; Popov et al., 2000; Serdiukova, 2013; Smoliar et al., 2007), etc.)

| Indicator name             | Impact on the human body – possible diseases                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mineralization             | Negative impact on pregnancy, fetus and newborns. Increases the likelihood of gynecological diseases. Negative influence on the secretory activity of digestive system, disrupts the water-salt balance, contributes to the development of diseases of circulatory system (ischemic heart disease, hypertension)                                                                                                                                                       |
| $\text{Cl}^-$              | Negative influence on the functions of digestive system. It causes inflammation of mucous membranes, irritation of the skin and respiratory organs, has carcinogenic and mutagenic properties and increases the risk of some abnormalities of intrauterine development. Causes itching, irritation, a feeling of tightness and dryness of the skin, irritation of mucous membrane of eyes and respiratory tract, negative effect on the hair structure                 |
| $\text{F}^-$               | Causes dental diseases – endemic fluorosis, tooth enamel hypoplasia, caries. Negative effect on the permeability of cell membranes. It reduces the exchange of phosphorus and calcium in bone tissues, disrupts carbohydrate, protein and other metabolic processes, inhibits tissue respiration, etc. It is a neurotropic poison that reduces the mobility of nervous processes                                                                                       |
| $\text{Fe}_{\text{total}}$ | Gradual destruction of the liver, toxicosis, decrease in hematopoiesis. It is part of respiratory pigments, participates in the transfer of oxygen to tissues in the body of humans, stimulates the function of hematopoietic organs                                                                                                                                                                                                                                   |
| $\text{Br}^-$              | Negative influence on the permeability of cell membranes, reaction with the 8 group of cysteine and methionine. Causes: dry cough, conjunctivitis, runny nose, skin rash, diarrhea, chronic intoxication, nausea, slurred speech                                                                                                                                                                                                                                       |
| $\text{B}^{3+}$            | A chronic digestive problem – boron enteritis, intoxication will affect the kidneys, liver and nervous system. The body becomes dehydrated, severe symptoms appear: vomiting, diarrhea, scaly skin rash, anemia, confusion, lack of appetite, cachexia – sudden weight loss, disappearance of subcutaneous fat, atrophy of organs and muscles, hair loss and skin laxity                                                                                               |
| $\text{J}^-$               | Negative influence on the permeability of cell membranes, reaction with the 8 group of cysteine and methionine. In the human body, it regulates: the speed of biochemical reactions; exchange of energy and body temperature; protein, fat, water-electrolyte metabolism; metabolism of some vitamins; differentiation of tissues, processes of growth and development of organism, in particular neuropsychological; induction of increased tissue oxygen consumption |

During the researches, about 20 networks of powerful urban water intakes in the region were found, on which

elevated values of above-mentioned indicator elements were traced. The most characteristic are water intakes of

Poltava, Karlivka, Krasnograd, Lubny, Khorol, Reshetylivka cities. Within these territories, the ecological consequences of man-made intervention in the underground hydrosphere are the greatest, since here the BKA groundwaters are partially or completely unsuitable for drinking purposes.

The authors have developed measures to minimize the ecological consequences of technogenic intervention in the BKA groundwater to increase the ecological safety of drinking water supply to the population from the water intakes of Poltava city agglomeration, which are strategically important for the studied region.

I. The system of groundwater hydrogeochemical monitoring at water intakes in conditions of pollutants filtration from the surface or their migration from below in the zones affected by tectonic faults associated with salt diapirs has been improved. These measures are based on the following:

- characteristic indicators of groundwater qualitative composition, according to which elevated values were established in the target aquifer waters, were determined. It is recommended to control their content on the basis of general (control of the entire complex of actual pollutants in the zones of influence of water intakes) and special

monitoring (control of mineralization, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Fe<sup>total</sup>, Br<sup>-</sup>, B<sup>3+</sup>, J<sup>-</sup> at the intersection of zones of powerful water intakes influence with territories in a radius of 5 km around tectonic faults). This significantly shortens the time and reduces the cost of works in comparison with a full complex of hydrogeochemical studies within the entire territory;

- proposed criteria for assessing the levels of groundwater pollution in the form of characteristic intervals of values for the above-mentioned hydrogeochemical indicators, which indicate the degree of water pollution (Tables 2, 3). This makes it possible to increase efficiency when making management decisions to improve the ecological safety of drinking water supply. These criteria are based on the use of average geological base content of polluting elements determined by the authors for the waters of studied area. The average geological base content (GBC) of elements is the content of chemical elements in the groundwater composition, which was determined from relevant values within the territories that are distant from sources of pollution and with minimal technogenic influence.

Table 2

The proposed levels of groundwater pollution for the general monitoring

| Name of the indicator, units                                   | The groundwater pollution levels |                                                              |                                                                      |                    |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------|
|                                                                | Unpolluted water                 |                                                              | Relatively polluted water<br>(a time of making management decisions) | Contaminated water |
|                                                                | Within the average GBC           | Within the current standards<br>(DSanPiN 2.2.4-171-10, 2010) |                                                                      |                    |
| Physical and chemical indicators                               |                                  |                                                              |                                                                      |                    |
| Mineralization, mg/dm <sup>3</sup>                             | ≤ 1150                           | ≤ 1000                                                       | 1150-2300                                                            | ≥ 2300             |
| pH                                                             | 6,6-7,6                          | 6,5-8,5                                                      | 6,0-8,5                                                              | ≤ 6,0; ≥ 8,5       |
| Cl <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>                           | ≤ 275                            | ≤ 250                                                        | 275-550                                                              | ≥ 550              |
| Fe <sup>total</sup> , mg/dm <sup>3</sup>                       | ≤ 0,25                           | ≤ 0,2                                                        | 0,25-0,5                                                             | ≥ 0,5              |
| Sanitary and toxicological indicators                          |                                  |                                                              |                                                                      |                    |
| Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , mg/dm <sup>3</sup>           | ≤ 300                            | ≤ 200                                                        | 300-600                                                              | ≥ 600              |
| F <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>                            | ≤ 2,0                            | ≤ 1,5                                                        | 2,0-4,0                                                              | ≥ 4,0              |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , mg/dm <sup>3</sup>              | ≤ 0,3                            | ≤ 0,5                                                        | 0,3-0,6                                                              | ≥ 0,6              |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>              | ≤ 0,1                            | ≤ 0,1                                                        | 0,1-0,2                                                              | ≥ 0,2              |
| Si, mg/dm <sup>3</sup>                                         | no data available                | ≤ 10                                                         | 10-30                                                                | ≥ 30               |
| Physical and chemical+Sanitary and toxicological indicators    |                                  |                                                              |                                                                      |                    |
| Br+B <sup>3+</sup> +J <sup>-</sup> (total), mg/dm <sup>3</sup> | ≤ 0,5                            | ≤ 0,55                                                       | 0,5-1,0                                                              | ≥ 1,0              |

Table 3

The proposed levels of groundwater pollution for the special monitoring

| Name of the indicator, units                                   | The groundwater pollution levels |                                                                      |                    |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------|
|                                                                | Unpolluted water                 | Relatively polluted water<br>(a time of making management decisions) | Contaminated water |
| Mineralization, mg/dm <sup>3</sup>                             | ≤ 1400                           | 1400-1600                                                            | ≥ 1600             |
| Cl <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup> / % equivalent            | ≤ 350 / 30                       | 350-450 / 30-35                                                      | ≥ 450 / 35         |
| F <sup>-</sup> , mg/dm <sup>3</sup>                            | ≤ 3,5                            | 3,5-4,0                                                              | ≥ 4,0              |
| Br+B <sup>3+</sup> +J <sup>-</sup> (total), mg/dm <sup>3</sup> | ≤ 1,0                            | 1,0-1,5                                                              | ≥ 1,5              |
| Fe <sup>total</sup> , mg/dm <sup>3</sup>                       | ≤ 0,5                            | 0,5-1,0                                                              | ≥ 1,0              |

II. Justification of selection of promising areas for the construction of new water intakes to solve the problem of acceptable quality drinking groundwater lack within the territory. The developed methodological approach to selection is complex and allows determining the degree of vulnerability of groundwater to pollution caused by each of the established groups of factors:

a) assessment of vulnerability to man-made pollution that enters groundwater in the process of downward vertical filtration and migration from the surface. It is based on the following ecological and hydrogeological indicators: the intensity of technogenic pressure on the GE and its changes within the territory; lithology-filtration protective capacity of barriers (sediment layers) that lie between the surface and

BKA; parameter of filtration through a regional separate layer of poorly permeable sediments; thickness of water-bearing rocks of target aquifer. Each of these indicators is evaluated in accordance with specially developed scales, according to which its value is determined depending on local ecological and hydrogeological characteristics;

b) assessment of vulnerability to natural pollution factors (migration of deep substandard waters through tectonic faults). It is based on the parameter of influence of natural neotectonic factors on the quality of BKA groundwater; an indicator of current geodynamic activity of the earth's crust within the region.

The authors have identified promising areas for creation new water intakes in a radius of 40 km around the Poltava

city with an area of 750 km<sup>2</sup> and have calculated using the balance method the forecast resources of high-quality BKA groundwater within their limits (54.5 thousand m<sup>3</sup>/day). Using these resources the current water supply of urban agglomeration will gradually be replaced with water of high drinking quality.

III. As a result of comparison of general water withdrawal data and studied hydrogeochemical indicators, dependencies have been obtained that made it possible to calculate the optimal total water withdrawal at the Poltava water intakes:

- to stabilize the content of characteristic indicators of BKA water quality composition within the eastern part of city, where the most intense pollution of these waters is observed, within the following values: mineralization up to 1150 mg/dm<sup>3</sup> (up to 1 GBC), Br+B<sup>3+</sup>+J<sup>-</sup> (in total) up to 0.5 mg/dm<sup>3</sup> (up to 1 GBC), Cl<sup>-</sup> up to 400 mg/dm<sup>3</sup> (up to 1.5 GBC), F<sup>-</sup> up to 3.0 mg/dm<sup>3</sup> (up to 1.5 GBC) – the total water withdrawal must be up to 16 thousand m<sup>3</sup>/day;

- to stabilize the content of characteristic hydrogeochemical indicators in the BKA water composition within other parts of city, where less intense pollution of these waters is observed, within the following values: mineralization up to 1150 mg/dm<sup>3</sup> (up to 1 GBC), Br+B<sup>3+</sup>+J<sup>-</sup> (total) up to 0.75 mg/dm<sup>3</sup> (up to 1.5 GBC), Cl<sup>-</sup> up to 275 mg/dm<sup>3</sup> (up to 1 GBC), F<sup>-</sup> up to 3.0 mg/dm<sup>3</sup> (up to 1.5 GBC) – total water withdrawal must be up to 40 thousand m<sup>3</sup>/day.

**Conclusions.** The purpose of article was to develop measures to improve the ecological safety of population drinking water supply with groundwaters of Buchak-Kaniv aquifer from urban water intakes in Eastern Ukraine.

The ecological consequences of man-made intervention in the BKA drinking groundwater in the studied area have been assessed. The main pollutant elements of these groundwaters have been traced (Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Fe<sub>total</sub>, Br, B<sup>3+</sup>, J<sup>-</sup>). About 20 networks of powerful urban water intakes in the region have been identified, on which elevated values of these elements have been traced. Within the water intakes of Poltava, Karlivka, Krasnograd, Lubny, Khorol, Reshetlivka cities, the ecological consequences of technogenic intervention in the underground hydrosphere are the greatest, as here the BKA groundwaters are partially or completely unsuitable for drinking purposes. The key role of technogenesis (intensification of groundwater withdrawal and expansion of water intakes network; as a result – changes in the hydrodynamic conditions of operational aquifers and the formation of their regional depression funnels) in these processes has been established. The increased content of Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Fe<sub>total</sub>, Br, B<sup>3+</sup>, J<sup>-</sup> in systematically consumed drinking water has a colossal effect on the human body, which can be expressed in a number of serious population diseases.

The authors have developed measures to minimize the above-mentioned ecological consequences of the BKA drinking groundwater technogenesis:

- the system of groundwater hydrogeochemical monitoring at the water intakes of region has been improved in conditions of filtration of pollutants from the surface and their migration from below in the zones affected by tectonic faults associated with salt diapirs;

- the allocation of promising areas for creating new water intakes to solve the problem of potable groundwater lack of acceptable quality within the research territory has been substantiated. Prospective areas within a radius of 40 km around the Poltava city have been identified (total area – 750 km<sup>2</sup>). Involvement of the calculated forecast resources of drinking groundwater (54.5 thousand m<sup>3</sup>/day) will provide

high-quality drinking water for the population of this urban agglomeration;

- optimal general water withdrawal at the Poltava water intakes has been substantiated: to stabilize the content of characteristic indicators in the BKA waters composition within the eastern part of city (up to 16 thousand m<sup>3</sup>/day); to stabilize the content of characteristic indicators in the BKA waters composition within other parts of city (up to 40 thousand m<sup>3</sup>/day).

#### References

- Aziz, A., Oudalov, I. V., Rouhollah, N., Ghasemi, N. (2015). Rational integration of ecologic-geological studies. *Ecology, environment and conservation*, 21, 4, 1625–1631.
- Dalla Libera, N., Fabbri, P., Mason, L., Piccinini, L. (2017). Geostatistics as a tool to improve the natural background level definition: An application in groundwater. *Science of The Total Environment*, 598, 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.018>.
- DSanPiN 2.2.4-171-10. (2010). State sanitary rules and norms "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption". Kyiv, 45. [in Ukrainian]
- Kononenko, A., Lurie, A., Udalov, I. (2018). Criteria for Assessing Groundwater Contamination Levels of Marl and Chalk Water Intakes in Eastern Ukraine. *Eastern European Scientific Journal*, 2, 13–17.
- Kononenko, A.V., Yakovlev, V.V. (2018). Justification of rational placement of new water intakes in the marl-chalk aquifer in the territory of Eastern Ukraine. *Hungarian scientific journal*, 23, 8–14. [in Ukrainian]
- Levonjuk, S.M., Udalov, I.V. (2018). Ecological and hydrochemical features of the transformation of drinking groundwater quality under the influence of technogenic and neotectonic factors (on the example of buchak-kaniv water intakes of Eastern Ukraine). *Research and environmental geochemistry*, 1 (19), 30–40. [in Ukrainian]
- Levonjuk, S.M. (2019). The influence of transformation of drinking groundwater qualitative composition on the population health within some urban agglomerations of the Eastern region. Materials of the International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists *REGION-2019: socio-geographical aspects*, Kharkiv, 151–153. [in Ukrainian]
- Molinari, A., Guadagnini, L., Marcaccio, M., Guadagnini, A. (2019). Geostatistical multimodel approach for the assessment of the spatial distribution of natural background concentrations in large-scale groundwater bodies. *Water Research*, 149, 522–532. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.049>.
- Nazarenko, E.A., Nikoziat, Yu.B., Ivashchenko, O.D. (2015). Assessment of health state of population living within the territory of biogeochemical province with high fluoride content. *Scientific and technical journal*, 2 (12), 80–84. [in Ukrainian]
- Ohniansky, N.S. (1985). Protection of groundwater in the conditions of technogenesis. Kyiv, 221. [in Russian]
- Popov, O.I., Podryhalo, L.V., Danylenko, H.N., Semko, N.H. (2000). The impact of fluorine and its derivatives on the environment and the human body. *Medical practice*, 1, 87–89. [in Russian]
- Preziosi, E., Parrone, D., Del Bon, A., Chergo, S. (2014). Natural background level assessment in groundwaters: probability plot versus pre-selection method. *Journal of Geochemical Exploration*, 143, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.015>.
- Serdiukova, O.O. (2013). Hydrogeochemical features of fluorine in the hypergenesis zone of Donbas and some aspects of its influence on the human body. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. The series "Geology. Geography. Ecology"*, 1084, 243–246. [in Ukrainian]
- Smoliar, V.I., Petrashenko, H.I. (2007). Excess fluoride in drinking water and fluoride intoxication. *Nutritional problems*, 1, 15–17. [in Ukrainian]
- Udalov, I.V., Levonjuk, S.M. (2019). Transformation of qualitative composition of drinking groundwater in the central part of DDAB. *Geochemistry of technogenesis*, 2 (30), 46–55. [in Ukrainian]
- Yakovlev, E.A. et al (1994). Temporary Methodological Guidelines for Conducting Integrated Ecological and Geological Surveys (on the territory of Ukraine). Kyiv, 331. [in Russian]
- Yakovlev, E.A., Yurkova, N.A., Sliadnev, V.A. (2001). Methodology for assessing the groundwater ecological state. *Ecology and resource saving*, 3, 56–59. [in Russian]

#### Список використаних джерел

- ДСанПіН 2.2.4-171-10. (2010). Державні санітарні правила і норми "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною". Київ, 45. (Стандарт Міністерства охорони здоров'я України).
- Кононенко, А.В., Яковлев, В.В. (2018). Обґрунтування раціонального розміщення нових водозаборів в мергельно-крейдяному водоносному горизонті на території Східної України. *Hungarian scientific journal*, 23, 8–14.
- Левонюк, С.М. (2019). Вплив трансформації якісного складу питних підземних вод на здоров'я населення у межах деяких міських агломерацій Східного регіону. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців РЕГІОН-2019: суспільно-географічні аспекти, 11-12 квітня 2019 р., Харків*, 151–153.
- Левонюк, С.М., Удалов, І.В. (2018). Еколого-гідрохімічні особливості трансформації якості питних підземних вод під впливом техногенних та

неотектонічних факторів (на прикладі бучацько-канівських водозаборів Східної України). *Пошукова та екологічна геохімія*, 1 (19), 30–40.

Назаренко, Е.А., Нікозять, Ю.Б., Івашенко, О.Д. (2015). Оцінка стану здоров'я населення, що проживає в межах території біогеохімічної провінції з підвищеним вмістом фторидів. *Науково-технічний журнал*, 2 (12), 80–84.

Огняник, Н.С. (1985). Охрана подземных вод в условиях техногенеза. Киев : Вища школа., 221.

Попов, О.И., Подригало, Л.В., Даниленко, Г.Н., Семко, Н.Г. (2000). Воздействие фтора и его производных на окружающую среду и организм человека. *Врачебная практика*, 1, 87–89.

Сердюкова, О.О. (2013). Гідрогеохімічні особливості фтора у зоні гіпергенезу Донбасу та деякі аспекти його впливу на організм людини. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 1084, 243–246.

Смоляр, В.І., Петрашенко, Г.І. (2007). Надлишок фтору в питній воді і фториста інтоксикація. *Проблеми харчування*, 1, 15–17.

Удалов, І.В., Левонюк, С.М. (2019). Трансформація якісного складу питних підземних вод центральної частини ДДАБ. *Геохімія техногенезу*, 2 (30), 46–55.

Яковлев, Е.А. и др. (1994). Временное методическое руководство по проведению комплексных эколого-геологических исследований (на территории Украины). Киев: ГПГ "Геопрогноз", 331.

Яковлев, Е.А., Юркова, Н.А., Сляднев, В.А. (2001). Методология оценки экологического состояния подземных вод. *Экология и ресурсосбережение*, 3, 56–59.

Aziz, A., Oudalov, I.V., Rouhollah, N., Ghasemi, N. (2015). Rational integration of ecologic-geological studies. *Ecology, environment and conservation*, 21, 4, 1625–1631.

Dalla Libera, N., Fabbri, P., Mason, L., Piccinini, L. (2017). Geostatistics as a tool to improve the natural background level definition: An application in groundwater. *Science of The Total Environment*, 598, 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.018>.

Kononenko, A., Lurie, A., Udalov, I. (2018). Criteria for Assessing Groundwater Contamination Levels of Marl and Chalk Water Intakes in Eastern Ukraine. *Eastern European Scientific Journal*, 2, 13–17.

Molinari, A., Guadagnini, L., Marcaccio, M., Guadagnini, A. (2019). Geostatistical multimodel approach for the assessment of the spatial distribution of natural background concentrations in large-scale groundwater bodies. *Water Research*, 149, 522–532. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.049>.

Preziosi, E., Parrone, D., Del Bon, A., Chergo, S. (2014). Natural background level assessment in groundwaters: probability plot versus pre-selection method. *Journal of Geochemical Exploration*, 143, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.015>.

Надійшла до редколегії 21.08.22

С. Левонюк, ст. наук. співроб.,

E-mail: [sergii.levonyuk@gmail.com](mailto:sergii.levonyuk@gmail.com),

АТ "Укргазвидобування", вул. Кудрявська, 26/28, Київ, 02000, Україна;

І. Удалов, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: [igorudalov8@gmail.com](mailto:igorudalov8@gmail.com),

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,

пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна

## РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ НАСЕЛЕННЯ СХІДНОЇ УКРАЇНИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД БУЧАЦЬКО-КАНІВСЬКОГО ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСУ

Розроблено заходи для підвищення екологічної безпеки питного водопостачання населення за рахунок використання підземних вод бучацько-канівського водонаосного комплексу з міських водозаборів Східної України.

Оцінено екологічні наслідки техногенного втручання в питні підземні води бучацько-канівського водонаосного комплексу території робіт. Виявлено основні елементи-забруднювачі цих підземних вод. Визначено водозабори (м. Полтава, Карлівка, Красноград, Лубни, Хорол, Решетилівка), на яких екологічні наслідки техногенного втручання в підземну гідросферу є найбільшими, оскільки тут цільові підземні води частково або повністю не придатні для питних цілей. Установлено ключову роль техногенезу (інтенсифікація водовідбору підземних вод та розширення мережі водозаборів і, як наслідок, зміни гідродинамічних умов експлуатаційних водонаосних комплексів та утворення їхніх регіональних депресійних ліній) у цих процесах. Підкреслено, що підвищений вміст досліджених елементів-забруднювачів у систематично споживаній питній воді має копосальний вплив на організм людини, що може виражатися у низці серйозних захворювань.

Розроблено заходи з мінімізації встановлених екологічних наслідків техногенезу питних підземних вод бучацько-канівського водонаосного комплексу для підвищення екологічної безпеки питного водопостачання населення із водозаборів Полтавської міської агломерації, які є стратегічно важливими для дослідженого регіону. Удосконалено систему гідрогеохімічного моніторингу підземних вод на водозаборах регіону для умов фільтрації забруднюючих речовин із поверхні або їх міграції знизу в зонах впливу тектонічних порушень, пов'язаних із соляними діпірами. Це значно скорочує час і зменшує вартість робіт порівняно з повним комплексом гідрогеохімічних досліджень у межах усієї території. Обґрунтовано виділення перспективних ділянок під закладання нових водозаборів для розв'язання проблеми нестачі питних підземних вод прийнятної якості в межах території робіт. Розраховано прогностичні ресурси питних підземних вод високої якості в радіусі 40 км навколо м. Полтава, залучення яких дозволить забезпечити високоякісною питною водою населення цієї міської агломерації. Обґрунтовано оптимальний загальний водовідбір на Полтавських водозаборах для стабілізації вмісту елементів-забруднювачів у складі вод бучацько-канівського водонаосного комплексу в межах різних частин міста.

Ключові слова: підземні води, забруднення, екологічна безпека, водозабори, заходи.

## ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 528.9:004.05

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.99.12>

Д. Ляшенко, д-р геогр. наук, доц.,

E-mail: [uageog@gmail.com](mailto:uageog@gmail.com);

І. Цюпа, канд. геол. наук,

E-mail: [tsyura@ukr.net](mailto:tsyura@ukr.net);

В. Бабій,

E-mail: [vitbabii@gmail.com](mailto:vitbabii@gmail.com);Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;

В. Чехній, канд. геогр. наук,

E-mail: [chekhniy@gmail.com](mailto:chekhniy@gmail.com);Інститут географії НАН України,  
вул. Володимирська, 44, м. Київ, 01054, УкраїнаЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ГЕОЕКОЛОГІЧНИХ КАРТ  
НА ЕТАПАХ СТВОРЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ

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

Розроблено схему забезпечення якості карт (на прикладі картографічних творів геоecологічної тематики) у процесі створення картографічних зображень, що проєктуються для широкого кола користувачів. Основними методологічними інструментами досліджень є концептуальне моделювання і метод експертного оцінювання. Досліджено підходи до формування концепцій якості карт та їхнього оцінювання: утилітаризм, консеквенціалізм, велферизм, принцип екологічної цінності. З огляду на важливість забезпечення якості карт геоecологічної тематики на всіх етапах життєвого циклу продукту головним методичним прийомом стає розроблена алгоритмічна модель. Визначено підходи, алгоритми і групи критеріїв дослідження якості карт геоecологічної тематики: внутрішня якість (з позиції виробника), показники зовнішньої якості (з позиції споживача), зокрема технологічні, споживчі критерії, наукова та суспільна цінність. У ході експериментальних досліджень запропоновано методику оцінювання низки споживчих характеристик карт геоecологічної тематики. Проведений експертний аналіз факторів, що впливають на оцінювання якості картографічного зображення, засвідчив, що ієрархія їхньої важливості вибудовується у такій послідовності: вдалий колорит, достатня контрастність зображення, компоновання (розмір і розміщення елементів карти), підписи. Сформульовано особливості забезпечення якості геоecологічних карт у процесі їх створення та підвищення ефективності використання.

**Ключові слова:** якість карт, суспільне значення карт, концептуальне моделювання, геоecологія, геоecологічні карти.

**Вступ.** В останні роки зростає увага фахівців до якості та надійності даних, що використовуються для інтелектуального аналізу, отримання знань про предметну область, прийняття рішень і дії (Gervais et al., 2009). Разом із тим, навіть за умови застосування сучасних та якісних даних, неправильна інтерпретація і створення на їх основі карт може призвести до хибних рішень. Для прикладу нами обрано вивчення особливостей оцінювання якості карт у межах геоecології – інтегративного напрямку в науці, який характеризується "...центрованістю на проблемах взаємодії людини із довкіллям; акцентуацією на територіальному характері цих проблем; наданням більшої уваги не аналізу структури, будови територіальних систем, а тим процесам, які в них відбуваються і, зокрема, призводять до певних станів цих систем" (Гродзинський, 2005; 108). Геоecологічний підхід, популярний нині, забезпечує пізнання геосистем за допомогою численних моделей (Зацерковний та ін., 2020).

**Постановка проблеми.** Починаючи із праць Джереми Бентама та Джона Стюарта Мілля, категорії якості та корисності стають невід'ємною рисою визначення результативності й ефективності діяльності. Нині традицію продовжують представники утилітаризму (від лат. *utilitas* – користь) і прагматизму. Першою властивістю утилітаристської етики є *консеквенціалізм* (від англ. *consequence* – наслідок), що передбачає оцінювання наслідків діяльності. Друга властивість утилітаризму позначається за допомогою поняття *велферизм* (від англ. *welfare* – добробут), що означає поліпшення добробуту людей (або "корисності" діяльності). Третьою властивістю утилітаристської етики є *сумарне оцінювання*, згідно з яким корисність окремих складових цілого складається із метою визначення їхнього сукупного надбання. На противагу утилітаризму постає увага до категорії цінності.

Питання збалансованого природокористування та якості природного середовища (що належить до сфери інтересів геоecології) "перестають бути власне господарськими, а стають етично-ціннісними пріоритетами" (Круглов, 2020; 59). Набуває ваги принцип екологічної цінності: "все життя на Землі – цінне, визнаючи цінність живої природи і взагалі всього живого, незалежно від корисності та способу використання" (Рихліцька, 2011).

Четверта промислова революція, що виявляється в інтеграції виробництва і комп'ютерних мереж шляхом використання кіберфізичних виробничих систем та інтернету, декларує підвищення якості життя. Прийняття цих нововведень вимагає перепрофілювання працівників (Marr, 2018) і вироблення нових підходів до збирання і оброблення просторової геоecологічної інформації. Ще однією тенденцією є економіка вражень, або економіка досвіду (*experience economy*) (Pine та Gilmore, 1998). Відомо, що інновації традиційно розглядаються як пов'язані із технологічним розвитком продукції. Однак більшість секторів товарного виробництва досягає фази, на якій технологічні інновації більше не становлять основи конкурентних переваг, натомість відбувається впровадження емоційної цінності, що доповнює існуючу функціональну цінність (Beltagui et al., 2012).

Нині державні інституції втрачають монополію на створення карт, поняття якості та цінності карт і геосервісів стає все більше індивідуалізованим та орієнтованим на конкретного споживача. Багато пересічних споживачів не мають достатнього досвіду оцінювання якості просторових даних та карт, що створюються на основі цих даних. Проте нехтування правилами класичної картографії знижує ефективність карт як інструментів пізнання навколишнього світу.

© Ляшенко Д., Цюпа І., Бабій В., Чехній В., 2022

З вищевикладеного стає зрозуміло, що за умов змін у технологіях виробництва та використання просторових даних поняття якості, цінності й ефективності карт розширюється і набуває нових вимірів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розрізняють внутрішню (дотримання стандартів виробництва просторових даних і карт) та зовнішню якість (зручність використання карт споживачем) (Gervais et al., 2009). Погляди на ці характеристики якості карт відзначаються еволюцією. У межах модельно-пізнавальної концепції картографії (Салищев, 1990) аналіз картографічних творів визначався як комплексне дослідження їхніх елементів і властивостей для визначення якості, а оцінювання картографічних творів розглядалося як визначення ступеню придатності карт для застосування при розв'язанні певних завдань. Визначали такі критерії: *математичну основу, геометричну точність, повноту змісту, достовірність, сучасність карт, якість оформлення, наукову цінність* (Салищев, 1990). Аналіз якості карт шляхом застосування кваліметричного підходу виконано в роботі (Гармиз, 1990). Виокремлено такі критерії, як *читаність, надійність, кондиційність, релевантність, дизайн, соціально-ідеологічна значущість*. Важливим етапом стало дослідження системи людина – карта і формулювання вимог до забезпечення надійності карт: *контрольованість, можливість внесення виправлень, інформаційна надійність, повнота, комунікаційна надійність* (Серапинас, 1995). Про надійність в оцінюванні спеціальних і тематичних карт ідеться в роботі (Донцов, 2016). Численні дослідники зазначали важливість дотримання якості вихідних даних у процесі створення карти: *позиційна точність і точність атрибутів об'єктів, а також логічна несуперечливість, повнота, походження* (Лурье, 2008). Тісно пов'язана зі споживчими характеристиками карт і якість інформаційної бази геоінформаційної системи (ГІС), серед них виділяють фактичне використання системи, задоволеність користувачів, отримання вигоди від експлуатації системи (Диденко, 2010). Про елементи оцінювання якості з позицій задоволеності вимог користувачів вели мову (Kahn et al., 2002), а канадські фахівці (Gervais et al., 2009) акцентували увагу на підході до управління ризиками у випадку неправильного використання просторових даних. Експериментальні роботи з оцінювання картографічного дизайну для карти зміни клімату запропонували (McKendry, Machlis, 2009). Методу забезпечення і контролю якості дизайну карт туристичної тематики наведено в роботі (Яловкіна, 2022).

**Виділення нерозв'язаних раніше аспектів загальної проблеми.** Існуючі підходи до оцінювання якості карт, представлені у нормативних документах, зводяться до оцінювання змісту, сучасності, достовірності, точності карт. Показники, зазначені у стандартах і технічних регламентах, вичерпно характеризують внутрішню якість цифрової карти (з позицій виробника), але не дають уявлення про споживчі характеристики внутрішньої якості карти для споживача і суспільства загалом. На тлі численних публікацій, присвячених оцінюванню якості баз просторових даних, дослідження споживчих характеристик якості карт практично не проводяться.

**Метою досліджень** є визначення завдань і методів підвищення якості геоєкологічних карт у ході їх створення і використання. Реалізація поставленої мети передбачає: 1) вивчення сучасних підходів до формування концепцій якості карт та їхнього оцінювання; 2) визначення алгоритму і критеріїв дослідження якості карт геоєкологічної тематики у процесі їх створення; 3) експертне оцінювання споживчих характеристик геоєкологічних

карт; 4) формулювання пропозицій щодо поліпшення якості геоєкологічних карт.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Квалітологія – наука про якість, заснована на системі взаємопов'язаних наукових принципів теорії управління якістю, кваліметрії і метрології (Зубецкая, 2015). Її витoki можна знайти у філософських ученнях: онтології, що описує спосіб існування і структуру реальності; епістемології, що стосується змісту, меж, методів та об'єктів людського пізнання; аксіології – ученні про цінність (Majchrzak et al., 2020). Оцінювання якості нині розуміється і здійснюється щодо товарів, послуг, даних, виробничих процесів і виробництва загалом (Juran, 1998).

У межах кваліметрії розробляють методи оцінювання якості конкретного об'єкта або процесу числом, що характеризує ступінь їхньої відповідності до певних вимог. При цьому якість визначається як деяка сукупність окремих корисних властивостей. Зазвичай ці властивості поділяють за ієрархічними рівнями залежно від ступеня їхньої спільності. До основних завдань кваліметрії відносять планування випуску нових виробів, дослідження ринку і забезпечення конкурентоспроможності товарів. Показники якості продукції обумовлені призначенням, надійністю і довговічністю, технологічністю, пов'язані зі стандартизацією і уніфікацією, ергономікою, естетикою тощо (Азгальдов, 1982).

Оцінювання карт, створення яких задіює як творчі, так і логічні аспекти нашого мислення, є не простим технічним завданням. Адже при створенні карти виконуються творчі процеси: розроблення змісту, легенди, умовних знаків карти, компонування; виконання генералізації (відбір, узагальнення); власне розміщення географічних об'єктів на карті (Яковлева, 2004).

У літературі поняття "якість" часто помилково відносять до точності просторових даних, відсутності невідповідності або помилки. Набори даних із високою просторовою точністю часто розглядають як високоякісні дані. Однак поняття якості виходить далеко за межі концепції просторової точності. Насправді воно зазвичай визнається як таке, що містить дві частини: внутрішню якість і зовнішню якість (Gervais et al., 2009).

Внутрішня якість належить до дотримання стандартів виробництва просторових даних і карт. Вона заснована на відсутності помилок у даних, процесах їх збирання та інтерпретації і стосується насамперед виробників даних (Лонский та ін., 2020). Ідеться про такі параметри: точність місцезположення і атрибутів, логічна послідовність, повнота просторових даних, якість метаданих (Van Oort, 2006; Hunter et al., 2009). Визначаються концептуальні підходи до забезпечення якості просторових даних у системі управління якістю надання геоінформаційних послуг на різних етапах життєвого циклу набору просторових даних (Карпінський та ін., 2012). Розробляються питання оцінювання якості просторових даних у ході створення загальногеографічних карт (Бондаренко та Писаренко, 2018). Відзначається важливість якості метаданих для оцінювання внутрішньої якості просторових даних (Капралов та ін., 2005). Використання для створення карт великих даних (Big Data) змінює спосіб збирання і аналізу даних. Справедливо, що використання Big Data може створити реальну цінність лише в поєднанні з якістю: ефективні рішення та дії є результатом правильних, надійних і повних даних. У такому сценарії необхідні методи оцінювання якості на основі типу даних у контексті, у якому дані мають використовуватися (Ardagna et al., 2018).

Другою важливою складовою ефективності використання карти або геосервісу є зовнішня якість,

що виявляється у задоволеності користувачів (Kahn et al., 2002), залежить від сучасності та коректності концепції зображення даних, зручності їхньої інтерпретації і оцінювання.

Етапи забезпечення та оцінювання якості у життєвому циклі створення і використання карт наведено на схемі (рис. 1).

Реалізацію схеми мають здійснювати виробники просторових даних, виробники та споживачі карт або геосервісів (рис. 2). Критерії якості та суспільної значущості карт можна згрупувати таким чином: якість вихідних просторових даних (внутрішня і зовнішня); якість створеної карти (внутрішня – технологічні характеристики, зовнішня – споживчі характеристики, суспільне значення карти).

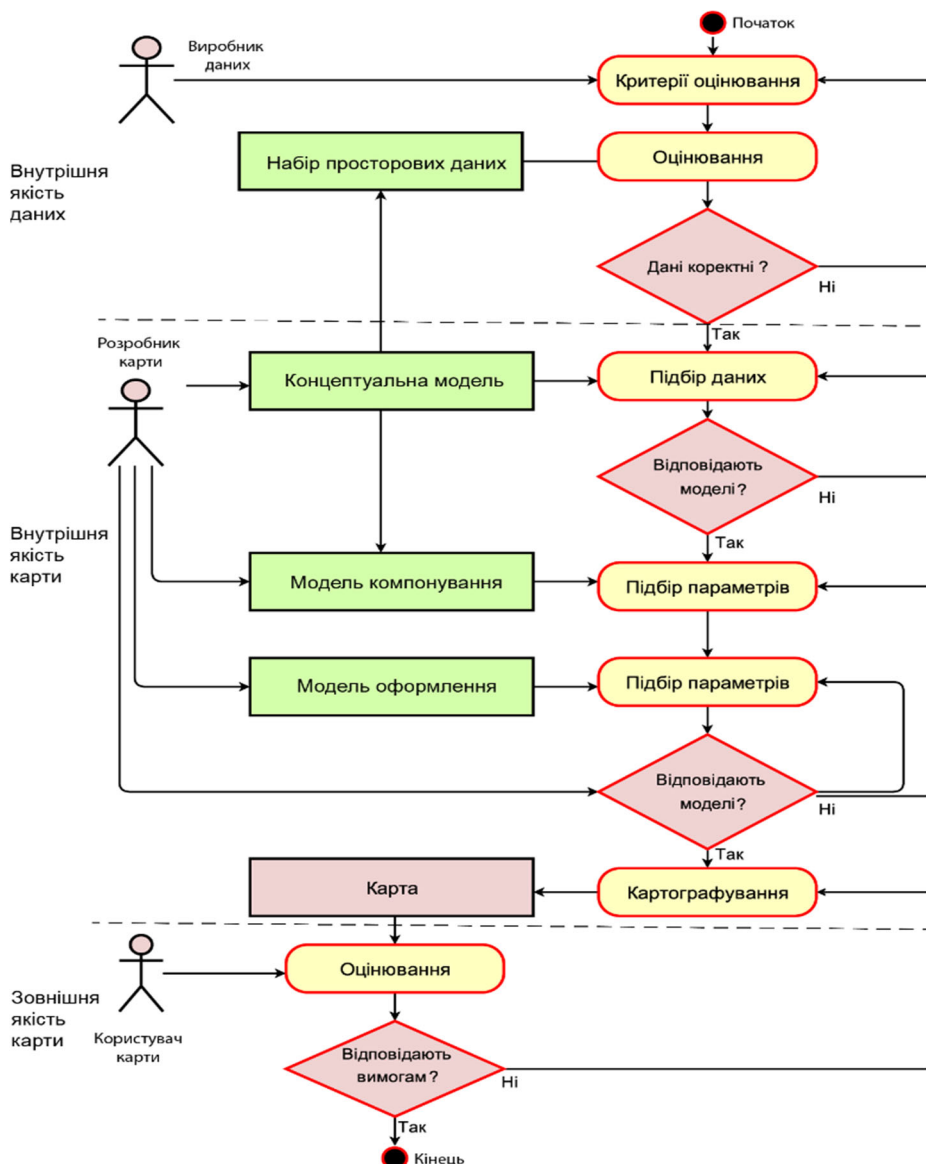


Рис. 1. Схема забезпечення та оцінювання якості у життєвому циклі створення і використання карт

На першому етапі виробник просторових даних шляхом дотримання стандартів і технічних регламентів забезпечує внутрішню якість просторових даних (точність місцеположення і атрибутів; логічну послідовність, повноту просторових даних, якість метаданих). Аналіз засвідчив, що етап виробництва просторових даних найбільш повно представлений у публікаціях (Карпінський та ін, 2012).

На другому етапі до забезпечення якості карт долучається група розробників (автор, картограф, ПІС-спеціаліст, редактор карти). Вони стежать за відповідністю зібраних просторових даних до **концептуальної моделі предметної області, моделей компоновки, моделей оформлення** (неформальних уявлень про гармонійний дизайн), що забезпечують внутрішню якість

карти, її релевантність знанням розробників про предметну область. При цьому ідеться про зовнішню якість просторових даних, яка є важливим чинником, що дозволяє забезпечити внутрішню якість карт.

На третьому етапі споживач цілеспрямовано або підсвідомо порівнює кожен картографічний твір із неформальними уявленнями про "ідеальну карту". Насамперед це стосується вдалого дизайну картографічного зображення та можливості зчитати закладену розробниками інформацію. Споживач оцінює карту, зважаючи на систему знань, переконань і цінностей, що сформована у нього, тобто порівнює зі своїми уявленнями щодо предметної області. Тут мають значення характеристики кондиційності (точність, повнота, достовірність), репутація розробника карти, ціннісна значущість карти в межах

соціально-культурної системи, у якій усвідомлює себе споживач (суспільне значення). Наприклад, після аварії

на Чорнобильській АЕС 1986 року суспільне значення картографування її наслідків в Україні суттєво зросло.

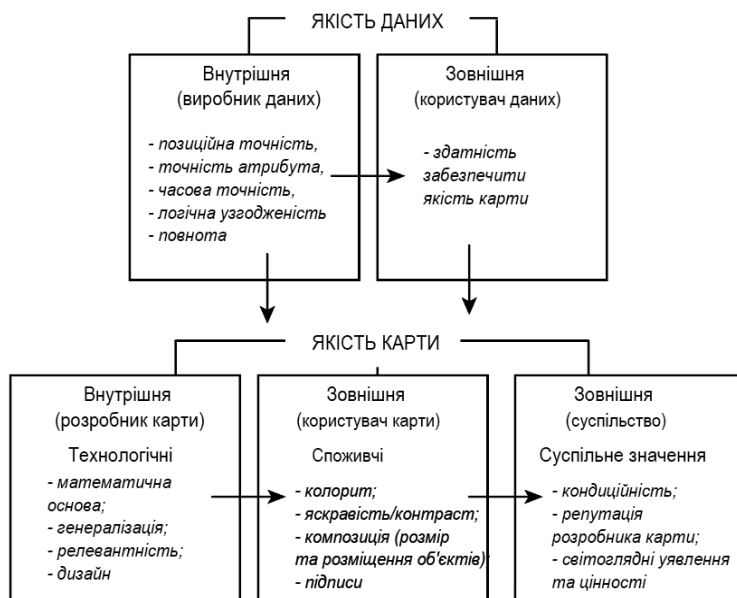


Рис. 2. Характеристики якості просторових даних і карт

Далі зосередимо увагу на **концептуальному моделюванні предметної області** геоєкології. Нині дослідження в галузі геоєкології виходять за межі утилітаризму та лежать у контексті парадигми збалансованого (стійкого, підтримуваного) розвитку. Стієкість за (O'Connor, 2006) характеризується як "спільна еволюція економічних, соціальних і екологічних систем" за умови системного регулювання і управління (політичної сфери). Останні роки до концепції сталого розвитку додають необхідність упровадження циркулярної економіки як "регенеративної системи, у якій введення ресурсів і відходи, викиди та витік енергії мінімізують шляхом уповільнення, закриття і звуження матеріальних та енергетичних ланцюгів" (Geissdoerfer, 2017). Очевидно, що згадані концепції є ціннісною основою геоєкологічних карт.

Геоєкологія досліджує трансформацію людиною геосистем у процесі її діяльності, зокрема формування міських ландшафтів (Romanukha et al., 2020), агроландшафтів (Яцухно та Мандер, 1995), територій видобутку корисних копалин тощо. У ході цієї трансформації за рахунок процесів тепло- і вологообміну, біогеохімічних кругообігів, певних видів господарської діяльності й соціокультурних відносин (Шищенко та Гавриленко, 2018; 10) змінюються всі складові ландшафту (Денисик, 2013) і надр, пов'язані з видобутком корисних копалин (Терещук, 2007; Trofymchuk et al., 2018; Руденко та ін., 2005). Останні потрапляють у сферу екологічної геології (Коржнев та ін., 2005; 224). Геоєкологія визначається як комплексна природнича наука, "...яка використовує географічний і екологічний підходи та досліджує геоекосистеми з метою оптимізації довкілля людини" (Шищенко та Гавриленко, 2018; 10). У літературі зустрічаються терміни *екологічна географія* (Барановский, 2001), *еколого-географічне картографування* (Бондаренко, 2007), *екологічне картографування* (Даценко та Ніжинська, 2018). У нашому дослідженні вважатимемо їх спорідненими напрямками картографування.

Об'єктом геоєкологічного картографування є **геоекосистеми** (ГЕС) різного ієрархічного рівня. Базова геоекосистема визначається як генеральна екологічна

просторова модель ландшафту, що покликана відображати його найсуттєвіші властивості (Кружлов, 2016; 169). До тематики геоєкологічного картографування віднесемо, по-перше, стан середовища – приземного повітря, вод, ґрунтів, рослинних угруповань та популяцій, ландшафтних структур загалом; напрямів і ефектів використання геологічного простору (печери, карстові порожнини, поровий простір геологічних формацій, гірничі виробки, копальні, штреки, шахти, кар'єри тощо) (Коржнев та ін., 2005; 37); по-друге, антропогенний тиск на середовище, що спричиняє його зміни (зміни гідрологічного режиму поверхневих водних об'єктів та ґрунтових вод, забруднення компонентів геоекосистем, зокрема хімічне, теплове, радіаційне й біологічне забруднення геологічних об'єктів, техногенна активізація геологічних процесів, зміни геофізичних і геохімічних полів, формування техногенних відкладів, зменшення біорізноманіття тощо); по-третє, оптимізацію середовища шляхом реалізації системи заходів, упорядкування та інтерпретацію даних про компоненти геоекосистеми та зміни їхніх параметрів у часі (напр. рекультивация території), експертизи екологічних наслідків освоєння території (Закон України..., 2017).

Карти геоєкологічної тематики найчастіше є оригінальними за змістом авторськими творами, і підбір математичної основи, ступеня генералізації змісту карти, створення макету компоновання характеризуються невизначеністю. Наприклад, зсуви ґрунту у великому масштабі займають площу, що виражається в масштабі карти і може відображатися способом ареалів, а у дрібному – позамасштабними ареалами або локалізованими значками. При створенні баз просторових даних, які містять велику кількість об'єктів, розташування кожного з них не завжди потрібне, важливіше значення мають відносні місця розташування об'єктів дослідження, а також зв'язки між ними, щільність, розподіл, ареали поширення тощо (Li et al., 2018).

До **споживчих характеристик** карти слід віднести насамперед дизайн та якість оформлення карти і, як наслідок, легкість її читання. У ході оцінювання якості карт геоєкологічної тематики (McKendry, Machlis, 2009) слід

здійснити критичний аналіз ефективності використання картографічної проєкції; ступеня генералізації, вдалої класифікації даних, макету карти, що акцентує увагу на головному, графічних змінних (відтінку та насиченості кольору, розмірів і форми знаків і візуальної ієрархії). Всі ці параметри добре узгоджуються із критеріями якісного дизайну, запропонованими в роботі (Яловкіна, 2020): читаність зображення, розрізнення, наочність, різноплановість, естетичність, інформативність, метричність.

**Суспільне значення** геоекологічних карт стосується їхнього ціннісного спрямування (суспільного блага, добробуту, збереження біосфери, виживання людської популяції). Різні базові настанови, наприклад біоцентричний і антропоцентричний підходи в картографуванні (Стурман, 2003; 8), можуть суперечити один одному. Говорячи про ціннісні аспекти геоекологічних карт, слід зазначити базові принципи, на основі яких можна здійснювати аналіз карт. Концепція "Ми не можемо чекати милості від природи, взяти її в неї – наше завдання", сформульована, як вважають, ботаніком Іваном Мічуріним, стала головним лейтмотивом споживацького ставлення до природи і нині не може бути ціннісним орієнтиром геоекології та природокористування. Ліберальні цінності приватної ініціативи та вигоди, що базуються на принципах вільного ринку і прав людини, нині перебувають у глибокій кризі та не дають вичерпної відповіді щодо збереження природного середовища. Прикладами застосування ліберальних цінностей є перенесення шкідливих виробництв до країн із недосконалим природоохоронним законодавством і знищення осередків дикої природи під гаслом забезпечення добробуту локальних спільнот. На нашу думку, визначення суспільного значення карт не є простим завданням. Найбільш адекватним світоглядним орієнтиром для оцінювання суспільного значення геоекологічних карт є ідея суспільного блага, яку фахівці спробували втілити у Доктрині "Україна 2030".

**Методика оцінювання споживчих характеристик карт.** Схема забезпечення якості геоекологічних карт

(див. рис. 1) передбачає здійснення аналізу й оцінювання карт на всіх етапах за допомогою кількісних та якісних методів дослідження. Кількісні методи передбачають використання структурованих або напівструктурованих анкет, які унеможливають вільний дискурс респондентів. Результати анкетування виражаються чисельно, що дозволяє застосувати математичні методи. Якісні ж методи передбачають використання методик глибоких інтерв'ю та наукового апарату психології, соціології, семіотики.

У роботі запропоновано методику опитування (експертного оцінювання) споживчих характеристик геоекологічних карт. За результатами опитування було здійснено кількісний і якісний аналіз.

Методика передбачає використання одного з можливих способів агрегування думок колективу експертів у задачі квантифікації переваг, виражених у вербальній формі. Анкету опитування створено на сервісі Google Forms <https://bit.ly/3lla41a>. Анкета була розповсюджена через посередництво авторів у різний спосіб (електронні листи, соціальні мережі тощо). Респондентами опитування обрано фахівців у галузі геоматики (науковці, викладачі ЗВО, студенти, що навчаються за спеціальністю 193 "Геодезія та землеустрій"). Для ідентифікації категорії користувачів обробляли додаткову інформацію з анкети. Опитування можна було здійснити лише одного разу, воно було цілком добровільним, без жодних заохочень учасників. У результаті опитування було проаналізовано 64 анкети. Запитання були однакові для всіх учасників: Чи ефективно на карті використані такі засоби зображення: 1) колорит, 2) яскравість/контраст, 3) розмір і розміщення знаків та фігур, 4) підписи. За базову модель опису переваг брали вербальні оцінки "відмінно", "задовільно", "жахливо". Відповіді респондентів щодо результатів оцінювання кожної карти було переведено у бали. Розраховано максимальні та мінімальні значення, медіану і середнє арифметичне для кожної карти та кожного критерію. Визначено внесок кожного критерію в підсумкову оцінку (табл. 1).

Таблиця 1

**Значення статистичної обробки результатів оцінювання характеристик картографічного зображення (бали)**

|                                                          | Критерії оцінювання якості картографічного зображення |                      |               |             |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|---------------|-------------|
|                                                          | Колорит                                               | Яскравість, контраст | Розмір знаків | Підписи     |
| Максимальне значення                                     | 57,1                                                  | 56,5                 | 57,8          | <b>58,0</b> |
| Мінімальне значення                                      | <b>40,0</b>                                           | 33,0                 | 30,3          | 19,7        |
| Різниця між максимальним і мінімальним значеннями оцінок | 17,0                                                  | 23,5                 | 27,5          | <b>38,3</b> |
| Медіана                                                  | <b>52,2</b>                                           | 49,9                 | 50,9          | 50,6        |
| Середнє арифметичне                                      | <b>51,0</b>                                           | 48,2                 | 47,7          | 45,7        |

Середнє значення оцінок за різними критеріями лежить у діапазоні від 45 до 51 бала, що може свідчити про таку ієрархію ролі критеріїв для оцінювання: 1) вдалий колорит, 2) достатня контрастність зображення, 3) компонування (розмір і розміщення елементів карти), 4) підписи. Про важливість кольору як зображувального засобу для карт кажуть багато фахівців (Christophe et al., 2011). Різниця між максимальним і мінімальним значеннями оцінок за критеріями має протилежну тенденцію (ефективність застосування підписів має найбільшу амплітуду оцінок для різних карт).

З метою поділу сукупності оцінюваних карт на групи проаналізовано подібність і відмінність (з погляду відстані) кожної карти одна від одної у просторі критеріїв. Для цієї мети було використано метод нейронних мереж, зокрема побудовані карти Кохонена, що самоорганізуються. Виконання кластеризації здійснено за допомогою програмного забезпечення Deductor Studio. Метод дозволив

побудувати семантичну карту, елементи якої утворили п'ять кластерів, де схожі приклади (вектори оцінок) зображуються близькими один до одного, а несхожі – протилежними (рис. 3).

Вважаємо карти Кохонена ефективним методом оброблення результатів оцінювання якості карт групою експертів.

Додаткові пункти анкети передбачали розгорнуту відповідь на запитання: "Які ще, на Вашу думку, параметри карти впливають на її наочність, інформативність, ефективність?" та "Що означає вдалий дизайн карти?". Семантичний аналіз відповідей на ці запитання було здійснено за допомогою вебресурсу <https://listio.com>. У результаті найуживанішими словами для опису ефективності карти були "зображення", "масштаб", "тематика", "актуальність". Серед характеристик вдалого дизайну карти респонденти найчастіше використовували терміни "кольори", "розмір", "підписи",

"інформація", "зрозумілість", "збалансованість", "компо-нування", "легкість читання".

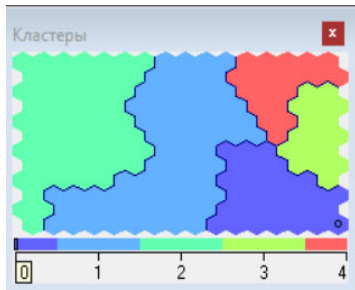


Рис. 3. Поділ множини оцінюваних карт на групи за показниками якості

Розглянемо напрями поліпшення якості карт у процесі їхнього створення. Легкість і доступність цифрових даних для копіювання та поширення призвела до різкого зростання використання геообразень низької якості. Фахівці справедливо зазначають, що важливо не просто візуалізувати існуючі дані. Спочатку слід дослідити предметну область, створити концептуальну модель і підібрати дані, які зможуть адекватно її відобразити. Така модель корисна для створення картографічної основи, вибору одиниць картографування.

**Концептуальна основа** створюваної карти базується на уявленні фахівців про геоекосистеми та просторово-часові аспекти їхнього функціонування. Такі уявлення можна розглядати як наукові образи, придатні для моделювання реальних ситуацій. Борис Родоман (Родоман, 2013) пропонує перелік деяких найхарактерніших абстрактних моделей геопростору: 1.1 – зернистий (такий, що суцільно складається з окремих тіл, ареалів, ділянок, тобто завжди дискретний); 1.2 – польовий (неперервний); 2 – мережевий (нібито витканий зі шляхів сполучення, водотоків або граничних ліній) та деякі його різновиди; 2.2 – поздовжньо зонований лінійно-вузловий, оточений фоном; 2.2.a – ареали-вузли, з'єднані коридорами і суміщені зі стилями вузлових районів; 2.5 – тканинний геопростір тощо. Ці наукові абстракції найтісніше пов'язані з уявленнями про біологічні, географічні та геологічні процеси, що відбуваються в геоекосистемах і виявляються у потоках тепла, вологи та хімічних речовин, міграції тварин тощо.

У більшості випадків створення геоекологічних карт передбачає комплексність відображення компонентів природного середовища, що виявляється в узгодженості інформаційних шарів: четвертинних відкладів, гідрогеології, рельєфу, гідрографії, ґрунтів. Це часто передбачає залучення фахівців різних галузей до роботи зі створення та редагування карт або атласів.

Оскільки нині створення карт відбувається в програмному середовищі, то технологія їх створення успадковує понятійно-термінологічний апарат і методи проєктування баз даних. При створенні геоекологічних карт також відбувається декомпозиція предметної області на окремі класи понять (концептуальні класи) або об'єкти відповідно до мети дослідження. Кожен об'єкт характеризується станом, певною поведінкою і унікальною ідентичністю. Об'єктно-орієнтований підхід до моделювання передбачає відображення логічних відношень між об'єктами різних тематичних груп та побудову концептуальних моделей.

Першим етапом моделювання майбутньої карти є створення концептуальної моделі, що будується у вигляді організаційних діаграм, які логічно упорядковують об'єкти, зв'язки, показники картографування тощо. Їх

найчастіше зображують за допомогою уніфікованої мови моделювання (UML), яка нині є невід'ємною частиною уніфікованого процесу розроблення програмного забезпечення і створення баз даних. Опис предметної області за допомогою UML у процесі створення карт є корисним з огляду на співпрацю авторів із фахівцями ІТ.

Для визначення характеристик якості для суспільства доречно в ході аналізу перевірити відповідність кожної карти до завдань і тематики геоекологічного картографування. Важливою при цьому є концепція **трансляційної екології** (англ. translational ecology), що пов'язує екологічні знання з прийняттям рішень, "інтегруючи екологічну науку з повним комплексом соціальних вимірів, що лежать в основі сучасних екологічних проблем" (Enquist et al., 2017). При цьому використовується концепція екосистемних послуг, що базується на ліберальній доктрині оцінювання прямої та опосередкованої вигоди, яку суспільство отримує від екосистеми (Carpenter et al., 2009; Fisher et al., 2009). Вітчизняні фахівці говорять про прикладну (оптимізаційну) геоекологію, що розробляє і впроваджує стратегії оцінювання, планування і управління довкіллям, запобігання критичним порушенням геоекологічних функцій компонентів природи та інтегрування результатів досліджень у практику територіального планування і менеджменту (Шищенко та Гавриленко, 2020). Певні карти дозволяють здійснити геоінформаційний аналіз території за допомогою констатуючих та прогнозних геоекологічних індикаторів (з різнобічною характеристикою та часткової) (Востокова та ін., 1988; 14-15).

На нашу думку, карти стають тим містком (рис. 4), що з'єднує наукові знання і практику прийняття управлінських рішень (Bitoun et al., 2022).

Рис. 4 ілюструє ланцюжок трансляції наукових знань від дослідників до осіб, що приймають управлінські рішення. Як показано на рисунку, фахівці за допомогою карт і геосервісів здійснюють об'єднування залежності між експлуатацією природного середовища та добробутом населення на певній території, розробляють індикатори оцінювання інтенсивності природокористування. Саме карти унаочнюють інформацію для зацікавлених сторін (стейкхолдерів): представників бізнесу, членів наукових кіл, уряду, неурядових організацій, осіб, які приймають рішення, місцевих громад. Важливим є вироблення зрозумілого для учасників процесу понятійно-термінологічного апарату (глосарія), зрозумілого всім учасникам, який виявиться у заголовках і текстах легенд карт.

**Географічна основа.** Нині стає популярним використання як географічної основи космофотозображень або різноманітних картографічних сервісів. Зростаюча кількість та якість доступних цифрових просторових даних, отриманих із БПЛА (безпілотних літальних апаратів), лазерним скануванням чи за допомогою супутникових знімків (космічні апарати "Landsat", "Sentinel" тощо), зумовлюють необхідність оцінювання їхньої якості.

Зростають можливості краудсорсингових картографічних сервісів, а оскільки такі ресурси, наприклад "Відкриту карту вулиць" (OpenStreetMap (OSM)), наповнюють просторовими даними не професіонали, а звичайні користувачі, то виникають сумніви щодо оцінювання їхньої точності та достовірності (Arsanjani et al., 2013; Haklay, 2010).

Сьогодні доступними джерелами є цифрові моделі рельєфу (ЦМР), створені на основі лідарних знімків різного просторового розрізнення, від БПЛА до космічних апаратів. Різноманітні доступні джерела – SRTM, хмари точок, топографічні карти – відображають різні рівні узагальнення рельєфу земної поверхні. Важливою вимогою

є відповідність детальності відображення рельєфу до масштабу моделі геоекосистеми. ЦМР дозволяє описати морфологічні властивості ландшафту. Морфометричні характеристики, отримані внаслідок аналізу висот і

мережі тальвегів та вододілів, передають просторову диференціацію фактичних і потенційних геоморфологічних процесів, а також створюваних внаслідок їхньої дії відкладів (Круглов, 2020; 105).

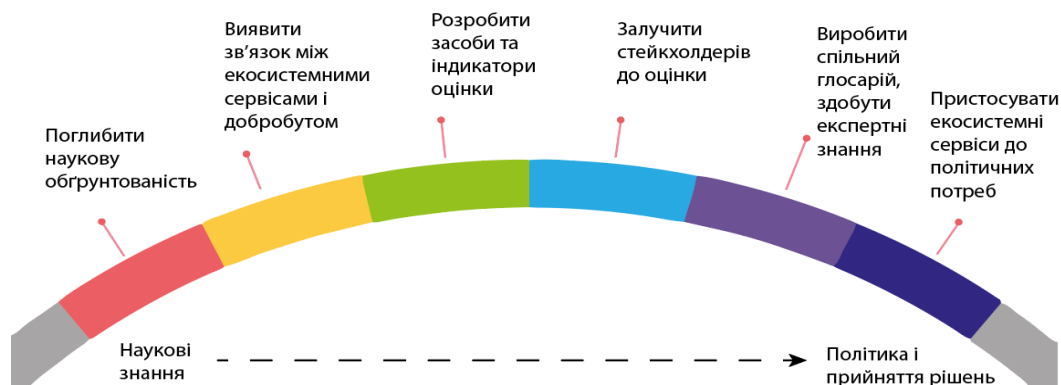


Рис. 4. Роль карт і геосервісів у трансляції наукових знань від науковців до управлінців (Bitoun et al., 2022) із доповненнями

**Одиниці картографування.** На основі абстрактних моделей геопростору виділяють одиниці картографування, тобто елементарні об'єкти карти, у межах яких відображаються параметри геоекосистем та їхніх компонентів. У більшості випадків ці параметри змінюються поступово, отже, проведення меж ареалів є доволі суб'єктивною задачею. Як одиниці картографування територіальних осередків організації інформації можуть використовуватися регулярні мережі, одиниці адміністративно-територіального поділу або природні ареали, урбанізовані райони, що виділяються за тематикою дослідження (річкові басейни, лісові масиви, промислові та видобувні регіони), також часто використовується мережа одиниць фізико-географічного районування.

У ГІС головними графічними примітивами є точки, лінії, полігони, поверхні, поля векторів, потоки, теселяції (структури даних, що поділяють двовимірні області на багатокутні плитки або тривимірні області таким чином, що фігури не перекриваються і не виникають прогалів). Постає слушне питання: які зі структур даних адекватно описують досліджуваний об'єкт, явище чи процес? Це питання слід ставити у процесі створення карти, а також у процесі аналізу карти та визначення її якісних характеристик. При цьому слід уявляти просторовий розподіл характеристик дискретних об'єктів, неперервних полів і речовинних та інформаційних потоків у геосистемах.

Вибір одиниць картографування здійснюється на основі територіального розподілу досліджуваних параметрів, наприклад геоморфологічних або екологічних одиниць (морфоскульптури, екорегіони тощо), і залежить від масштабу дослідження. Загалом слід погодитися з І. Кругловим про доцільність спрощеного підходу, адже відображення на картах меж і характеристик просторових одиниць усіх ієрархічних рангів може бути надмірним і ускладнювати сприйняття змісту. Також важливо, що під час експедиційних геоекологічних досліджень межі дрібних одиниць обліку інформації переважно не знімають – фіксують лише координати центроїдів та їхні орієнтовні розміри і конфігурацію (Круглов, 2020; 130).

**Джерела даних.** Якість карти визначається підбором відповідних джерел просторових даних. Створення геоекологічних карт базується на синтезі інформації про стан середовища з різних тематичних галузей знань. Важливим джерелом даних є ДЗЗ у різних діапазонах спектра та різного просторового розрізнення (БПЛА, літаки,

супутники). За цими даними визначають температуру поверхні, зімкнутість намету деревостану, висоту дерев, площу та фрагментацію угідь, переважаючі типи рослинності, вегетаційні індекси тощо. Об'єкти ситуації на території (водно-болотні угіддя, ліси, луки, забудовані землі, рілля тощо) корисні для виділення меж геоекологічних ареалів. Параметри цих об'єктів отримують шляхом оброблення даних дистанційного зондування або запозичують зі спеціалізованих геопросторових баз даних, наприклад CORINE (Круглов, 2020; 113). БПЛА дозволяють визначити зімкнутість крон, розміщення гнізд птахів і підрахувати кількість особин великих тварин.

Іншим важливим джерелом даних для карт є дані про рельєф – його типи, форми та асоціації форм. Ці дані пов'язані зі складом і властивостями відкладів, а отже, і параметрами міграції води та розчинених у ній речовин у літосфері.

Новітня апаратура (GPS навігатори, планшети, смартфони та цифрові засоби аудіовізуальної фіксації даних) дозволяє визначити положення у просторі ділянок із варіаціями експозиції і крутості схилів, фенологічних характеристик, фрагментації ландшафтів тощо. Для моніторингу біоти використовують GPS-ошейники, фотопастки тощо.

**Висновки.** Актуальність представленої авторської схеми забезпечення якості геоекологічних карт полягає у формуванні наукової основи для проведення їх аналізу й оцінювання на всіх етапах створення карт, а також у процесі використання.

Методологічна база дослідження ґрунтується на теорії забезпечення якості продукції. На кожному етапі створення і використання геоекологічних карт визначаються учасники процесу аналізу й оцінювання (виробники просторових даних, розробники карт, рецензенти та кінцеві користувачі). Авторська схема відображає відповідальних за забезпечення внутрішньої якості просторових даних (розробники даних), внутрішньої якості карт (розробники карт), зовнішньої якості карт (споживачі, редакторів, рецензентів). Визначено складові технології оцінювання карт: кількісні методи (структуровані або напівструктуровані анкети); якісні методи (інтерв'ю, семіотичний аналіз тощо).

Особливу увагу в роботі приділено опрацюванню варіанта оцінювання низки споживчих характеристик оформлення карт. Визначено перелік критеріїв оцінювання: колорит, яскравість і контраст, композиція і використання підписів. Здійснене опитування щодо споживчих характеристик якості карт, з одного боку, сприяло засвоєнню

студентами теми "Картографічний дизайн", з іншого – аналіз результатів дозволив сформулювати тезу про надзвичайну важливість кольорового оформлення для реалізації завдань ефективності карти, що означає донесення до читачів її головного повідомлення.

Сформульовано напрями поліпшення якості геоecологічних карт на етапах вибору географічної основи, одинокі картографування і відповідних джерел просторових даних. Подальший розвиток цього напрямку передбачається здійснювати у двох аспектах: розроблення основних положень теорії аналізу й оцінювання карт і продовження експериментальних робіт.

#### Список використаних джерел

- Азгальдов, Г. (1982). Теория и практика оценки качества товаров. Основы квалиметрии. Москва: Экономика.
- Барановський, В.А. (2001). Екологічна географія і екологічна картографія. Київ: Фітосоціоцентр.
- Бондаренко, Е.Л. (2007). Геоінформаційне еколого-географічне картографування. Київ: Фітосоціоцентр.
- Бондаренко, Е., Писаренко, Р. (2018). Якість цифрових просторових даних як визначальна складова інформаційного забезпечення сучасних загальногеографічних карт. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 2(39), 6–11.
- Востокова, Е.А., Сушеня, В.А., Шевченко, Л.А. (1988). Экологическое картографирование на основе космической информации. Москва: Недра.
- Гармиз, И. (1990). Теоретические основы и методы оценки качества карт. *Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 05.24.03*. Ленинград.
- Гродзинський, М.Д. (2005). Пізнання ландшафту: Місце і простір. Т. 1. ВПЦ "Київський університет".
- Дацинко, Л., Ніжинська, Ю. (2018). Особливості екологічного картографування території для навчальних цілей. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 2, 12–15.
- Денисик, Г.І. (2013). Антропогенне ландшафтознавство у першій половині ХХІ століття. *Наукові записки. Серія: Географія: зб. наук. пр. Вінниць. держ. пед. ун-ту ім. М. Коцюбинського*, 25, 7–12.
- Диденко, Д. (2010). Разработка модели оценки качества информации в ГИС. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, 105(4), 4.
- Донцов, О. (2016). Надійність карт і планів у забезпеченні туристично-екскурсійної діяльності. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, 24, 34–38.
- Закон України "Про оцінку впливу на довкілля". (2017). Верховна рада України, № 2059-VIII.
- Зацерковний, В., Плічко, Л., Приліпко, О., Ніколаєнко, О., Мужанова, Т. (2020). Обґрунтування доцільності застосування геоінформаційних систем у ландшафтно-екологічному моніторингу. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (88), 98–105.
- Зубецкая, Н.А. (2015). Структурное моделирование качества продукции как многомерного объекта измерения и управления. *Технологический аудит и резервы производства*, 22, 44–48.
- Карпінський, Ю.О., Лященко, А.А., Горковчук, М.В. (2012). Концептуальні засади оцінювання та забезпечення якості геопросторових даних. *Вісник геодезії та картографії*, 4, 33–42.
- Капранов, Е.Г., Кошкарєв, А.В., Тикунов, В.С. (2005). Геоинформатика. М.: "Академия".
- Коржнев, М., Вижва, С., Кошляков, О., Гожик, А., Корнєєнко, С., Байсарович, І., Аксьом, О., Сухіна, О. (2005). Екологічна геологія. Підручник. ВПЦ "Київський університет".
- Круглов, І. (2016). Базова геоecосистема (Б-ГЕС) як інтегруючий об'єкт трансдисциплінарної геоecології. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Географія*, 2(41), 168–178.
- Круглов, І. (2020). Трансдисциплінарна геоecологія. Монографія. ЛНУ ім. І. Франка.
- Лонский, И.И., Степанченко, А.Л., Шлапак, В.В. (2020). Качество картографического произведения. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, 64(5), 541–544.
- Лурье, И.К. (2008). Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. Учебник. КДУ.
- Рихліцька, О.Д. (2011). Екологічна етика: Проблема цінностей. *Вісник Житомирського державного університету*, 57, 23–27.
- Родоман, Б. (2013). Сетевые и анизотропные географические пространства. *Проблемы теоретической и гуманитарной географии: Сборник научных статей, посвященный 80-летию со дня рождения Б.Б. Родомана*, 75–83.
- Руденко, Л.Г., Палієнко, В.П., Барцевський, М.Є., Бочковська, А.І., Горленко, І.О., Гукалова, І.В., Дубін, В.Г., Жилкін, С.В., Лісовський, С.А., Матвішина, Ж.М., Нагірний, В.М., Передерій, В.І., Разов, В.П. (2005). Проблеми природокористування в гірничодобувних районах України (географічний аспект). *Український географічний журнал*, 3, 18–23.
- Салищев, К.А. (1990). Картоведение.
- Серапинас, Б.Б. (1995). Надежность использования карт в географических исследованиях. *Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 05.24.03*. Москва. Отримано з <http://tekhnosfera.com/nadezhnost-ispolzovaniya-kart-v-geograficheskikh-issledovaniyah>
- Стурман, В.И. (2003). Экологическое картографирование. Учебное пособие. Аспект Пресс.
- Терещук, О. (2007). Вплив відвалів гірничодобувної промисловості на навколишнє середовище Новолинінського гірничопромислового району. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*, 34, 279–285.
- Шищенко, П., Гавриленко, О. (2018). Геоecологія у науково-освітньому вимірі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія*, 70, 9–15.
- Шищенко, П., Гавриленко, О. (2020). Прикладна геоecологія. Київ: ПБТП "LAT&K", 440.
- Яковлева, Р. (2004). Вопросы авторства применительно к разным этапам создания карт и различным видам картографических произведений. *Интеллектуальная собственность. Авторское право и смежные права*, 9, 19–33.
- Яловкина, Л. (2020). О результатах разработки методики обеспечения и контроля качества дизайна картографического изображения. *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*, 25(1), 211–221.
- Ялущко, В.М., Мандер, Ю.Э. (1995). Формирование агроландшафтов и охрана природной среды. Ин-т геол. наук АН БССР.
- Ardagna, D., Cappiello, C., Samà, W., & Vitali, M. (2018). Context-aware data quality assessment for big data. *Future Generation Computer Systems*, 89, 548–562. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.014>
- Arsanjani, J.J., Barron, C., Bakillah, M., Helbich, M. (2013). Assessing the Quality of OpenStreetMap Contributors together with their Contributions.
- Beltagui, A., Candi, M., & Riedel, J.C.K.H. (2012). Design in the Experience Economy: Using Emotional Design for Service Innovation. В K. S. Swan & S. Zou (Eds.), *Advances in International Marketing*, 23, 111–135. Emerald Group Publishing Limited.
- Bitoun, R.E., Trégarot, E., & Devillers, R. (2022). Bridging theory and practice in ecosystem services mapping: A systematic review. *Environment Systems and Decisions*, 42(1), 103–116. <https://doi.org/10.1007/s10669-021-09839-7>
- Carpenter, S.R., Mooney, H.A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R.S., Diaz, S., Dietz, T., Duraipappah, A.K., Oteng-Yeboah, A., Pereira, H.M., Perrings, C., Reid, W.V., Sarukhan, J., Scholes, R.J., Whyte, A. (2009). Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(5), 1305–1312.
- Christophe, S., Christine, Z., Roussaffa, H. (2011). Colours harmony in cartography.
- Enquist, C.A., Jackson, S.T., Garfin, G.M., Davis, F.W., Gerber, L.R., Littell, J.A., Tank, J.L., Terando, A.J., Wall, T.U., Halpern, B., Hiers, J.K., Morelli, T.L., McNie, E., Stephenson, N.L., Williamson, M.A., Woodhouse, C.A., Yung, L., Brunson, M.W., Hall, K.R., ... Shaw, M.R. (2017). Foundations of translational ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(10), 541–550.
- Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., Hultink, E. (2017). The Circular Economy – A New Sustainability Paradigm? <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048>
- Gervais, M., Bédard, Y., Levesque, M.-A. (2009). Data Quality Issues and Geographic Knowledge Discovery. <https://doi.org/10.1201/9781420073980.ch5>
- Haklay, M. (2010). How Good is Volunteered Geographical Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(4), 682–703.
- Hunter, G.J., Bregt, A.K., Heuvelink, G.B.M., De Bruin, S., & Vriantaus, K. (2009). Spatial Data Quality: Problems and Prospects. In B.G. Navratil (Eds.), *Research Trends in Geographic Information Science*, 101–121.
- Juran, J.M., Gryna, F.M., Bingham, R.S. (Eds.). (1974). Quality control handbook (3d ed). McGraw-Hill.
- Kahn, B.K., Strong, D.M. and Wang, R.Y. (2002). Information Quality Benchmarks: Product and service performance. *Communications of the ACM*, 45(4), 184–192.
- Li, L., Ban, H., Wechsler, S.P., Xu, B. (2018). Spatial Data Uncertainty. B Comprehensive Geographic Information Systems, 313–340.
- Majchrzak, J., Goliński, M., Mantura, W. (2020). The concept of the quality and grey system theory application in marketing information quality cognition and assessment. *Central European Journal of Operations Research*, 28(2), 817–840.
- McKendry, J.E., Machlis, G.E. (2009). Cartographic design and the quality of climate change maps. *Climatic Change*, 95(1), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9519-5>
- Marr, B. (2018). The 4th Industrial Revolution: How Mining Companies Are Using AI, Machine Learning And Robots. Forbes.
- O'Connor, M. (2006). The "Four Spheres" framework for sustainability. *Ecological Complexity*, 3(4), 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2007.02.002>
- Pine, B.J., Gilmore, J.H. (1998). Welcome to the Experience Economy. Harvard Business Review.
- Romanukha, D.P., Zatserkovnyi, V.I., Savkov, P.A., Pampukha, I.V., Syniavska, I.K. (2020). Valuation of the impact of urbanization on the geoeological problems of the megapolis. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020*, 1–5.
- Trofymchuk, O.M., Korzhnev, M.M., Yakovlev, Ye.O., Kurylo, M.M., Kosharna, S.K. (2018). Conceptual approaches to organization of monitoring

of geological environment and mineral resources of Ukraine in modern terms. *Environmental safety and natural resources*, 28(4), 7–26.

Van Oort, P. (2006). Spatial data quality: From description to application. *PhD Thesis*.

## References

- Ardagna, D., Cappiello, C., Samá, W., & Vitali, M. (2018). Context-aware data quality assessment for big data. *Future Generation Computer Systems*, 89, 548–562. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.014>
- Arsanjani, J.J., Barron, C., Bakillah, M., Helbich, M. (2013). Assessing the Quality of OpenStreetMap Contributors together with their Contributions. *Azgalov, G. (1982). Theory and practice of product quality assessment. Fundamentals of qualimetry. Moscow: Economy. [in Russian]*
- Baranovskyi, V.A. (2001). Ecological geography and ecological cartography. Kyiv: Phytosocial Center. [in Ukrainian]
- Beltagui, A., Candi, M., & Riedel, J.C.K.H. (2012). Design in the Experience Economy: Using Emotional Design for Service Innovation. B K. S. Swan & S. Zou (Eds.), *Advances in International Marketing*, 23, 111–135. Emerald Group Publishing Limited.
- Bitoun, R.E., Trégarot, E., & Devillers, R. (2022). Bridging theory and practice in ecosystem services mapping: A systematic review. *Environment Systems and Decisions*, 42(1), 103–116. <https://doi.org/10.1007/s10669-021-09839-7>
- Bondarenko, E., Pisarenko, R. (2018). The quality of digital spatial data as a determining component of the information support of modern general geographic maps. *Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. Military Special Sciences*, 2(39), 6–11. [in Ukrainian]
- Bondarenko, E.L. (2007). Geo-information ecological and geographical mapping. Kyiv: Phytosocial Center. [in Ukrainian]
- Carpenter, S.R., Mooney, H.A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R.S., Diaz, S., Dietz, T., Duraipah, A.K., Oteng-Yeboah, A., Pereira, H.M., Perrings, C., Reid, W.V., Sarukhan, J., Scholes, R.J., Whyte, A. (2009). Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(5), 1305–1312.
- Christophe, S., Christine, Z., Roussaffa, H. (2011). Colours harmony in cartography.
- Datsenko, L., Nizhynska, Yu. (2018). Peculiarities of ecological mapping of the territory for educational purposes. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv Military and Special Sciences*, 2(2018), 12–15. [in Ukrainian]
- Denisyk, G.I. (2013). Anthropogenic landscape science in the first half of the 21st century. *Proceedings. Series: Geography: coll. of science Ave. Vinnytsia. state ped. University named after M. Kotsyubynsky*, 25, 7–12. [in Ukrainian]
- Didenko, D. (2010). Development of a model for assessing the quality of information in GIS. Bulletin of the Southern Federal University. *Technical Sciences*, 105(4), 4. [in Russian]
- Dontsov, O. (2016). Reliability of maps and plans in providing tourist and excursion activities. *Problems of continuous geographical education and cartography*, 24, 34–38. [in Russian]
- Enquist, C.A., Jackson, S.T., Garfin, G.M., Davis, F.W., Gerber, L.R., Littell, J.A., Tank, J.L., Terando, A.J., Wall, T.U., Halpern, B., Hiers, J.K., Morelli, T.L., McNie, E., Stephenson, N.L., Williamson, M.A., Woodhouse, C.A., Yung, L., Brunson, M.W., Hall, K.R., ... Shaw, M.R. (2017). Foundations of translational ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(10), 541–550.
- Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653.
- Garmiz, I. (1990). Theoretical foundations and methods of map quality assessment. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geogr.): 05.24.03. Leningrad. [in Russian]*
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., Hultink, E. (2017). The Circular Economy – A New Sustainability Paradigm? <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048>
- Gervais, M., Bédard, Y., Levesque, M.-A. (2009). Data Quality Issues and Geographic Knowledge Discovery. <https://doi.org/10.1201/9781420073980.ch5>
- Grodzinsky, M.D. (2005). Knowledge of the landscape: Place and space. Vol. 1. VOC: "Kyiv University".
- Haklay, M. (2010). How Good is Volunteered Geographical Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(4), 682–703.
- Hunter, G.J., Bregt, A.K., Heuvelink, G.B.M., De Bruin, S., & Verranta, K. (2009). Spatial Data Quality: Problems and Prospects. In BG. Navratil (Eds.), *Research Trends in Geographic Information Science*, 101–121.
- Juran, J.M., Gryna, F.M., Bingham, R.S. (Eds.). (1974). Quality control handbook (3d ed). McGraw-Hill.
- Kahn, B.K., Strong, D.M. and Wang, R.Y. (2002). Information Quality Benchmarks: Product and service performance. *Communications of the ACM*, 45(4), 184–192.
- Kapralov, E.G., Koshkarev, A.V., Tykunov, V.S. (2005). Geoinformatics. M.: "Akademiya". [in Russian]
- Karpinsky, Yu.O., Lyashchenko, A.A., & Horkovchuk, M.V. (2012). Conceptual principles of evaluation and quality assurance of geospatial data. *Bulletin of Geodesy and Cartography*, 4, 33–42. [in Ukrainian]
- Korzhnev, M., Vyzhva, S., Koshlyakov, O., Gozhik, A., Korneenko, S., Baisarovych, I., Aksyom, O., Sukhina, O. (2005). Ecological geology. Textbook. VOC "Kyiv University". [in Ukrainian]
- Kruglov, I. (2016). Basic geoecosystem (B-HES) as an integrating object of transdisciplinary geoeology. *Scientific notes of Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk. Geography*, 2(41), 168–178.
- Kruglov, I. (2020). Transdisciplinary geoeology. Monograph. I. Franko LNU. [in Ukrainian]
- Law of Ukraine "On Environmental Impact Assessment". (2017). Verkhovna Rada of Ukraine, No. 2059-VIII. [in Ukrainian]
- Li, L., Ban, H., Wechsler, S.P., Xu, B. (2018). Spatial Data Uncertainty. B Comprehensive Geographic Information Systems, 313–340.
- Lonsky, I.I., Stepanchenko, A.L., & Shlapak, V.V. (2020). The quality of the cartographic work. *Bulletins of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 64(5), 541–544. [in Russian]
- Lurie, I.K. (2008). Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of space images. Textbook. KSU. [in Russian]
- Majchrzak, J., Goliński, M., Mantura, W. (2020). The concept of the quality and grey system theory application in marketing information quality cognition and assessment. *Central European Journal of Operations Research*, 28(2), 817–840.
- Marr, B. (2018). The 4th Industrial Revolution: How Mining Companies Are Using AI, Machine Learning And Robots. Forbes.
- McKendry, J.E., Machlis, G.E. (2009). Cartographic design and the quality of climate change maps. *Climatic Change*, 95(1), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9519-5>
- O'Connor, M. (2006). The "Four Spheres" framework for sustainability. *Ecological Complexity*, 3(4), 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2007.02.002>
- Pine, B.J., Gilmore, J.H. (1998). Welcome to the Experience Economy. Harvard Business Review.
- Rodoman, B. (2013). Network and anisotropic geographic spaces. Problems of Theoretical and Humanitarian Geography. *A collection of scientific articles dedicated to the 80th anniversary of the birth of B.B. Rhodoman*, 75–83. [in Russian]
- Romanukha, D.P., Zatserkovnyi, V.I., Savkov, P.A., Pampukha, I.V., Syniavska, I.K. (2020). Valuation of the impact of urbanization on the geoeological problems of the megapolis. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020*, 1–5.
- Rudenko, L.G., Palienko, V.P., Barshchevskii, M.E., Bochkovskaya, A.I., Horlenko, I.O., Hukalova, I.V., Dubin, V.G., Zhilkin, S.V., Lisovsky, S.A., Matviishyna, Zh.M., Nagirny, V.M., Perederii, V.I., Razov, V.P. (2005). Problems of nature management in mining areas of Ukraine (geographical aspect). *Ukrainian Geographical Journal*, 3, 18–23. [in Ukrainian]
- Rykhlytska, O.D. (2011). Environmental ethics: The problem of values. *Bulletin of Zhytomyr State University*, 57, 23–27. [in Russian]
- Salishchev, K.A. (1990). Cartography. [in Russian]
- Serapinas, B.B. (1995). Reliability of using maps in geographic research. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geogr.): 05.24.03. Moscow. Retrieved from http://teknosfera.com/nadezhnost-ispolzovaniya-kart-v-geograficheskikh-issledovaniyakh. [in Russian]*
- Shishchenko, P., Havrylenko, O. (2018). Geoecology in the scientific and educational dimension. *Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University, Geography*, 70, 9–15.
- Shishchenko, P., Havrylenko, O. (2020). Applied geoecology. Kyiv: PVTP "LAT&K", 440. [in Ukrainian]
- Sturman, V.I. (2003). Ecological mapping: Study guide. Aspect Press. [in Russian]
- Tereshchuk, O. (2007). The impact of mining waste dumps on the environment of the Novovolynsk mining district. *Bulletin of Lviv University. Geographical series*, 34, 279–285. [in Ukrainian]
- Trofymchuk, O.M., Korzhnev, M.M., Yakovlev, Ye. O., Kurylo, M.M., Kosharna, S.K. (2018). Conceptual approaches to organization of monitoring of geological environment and mineral resources of Ukraine in modern terms. *Environmental safety and natural resources*, 28(4), 7–26.
- Van Oort, P. (2006). Spatial data quality: From description to application. *PhD Thesis*.
- Vostokova, E.A., Sushchenya, V.A., Shevchenko, L.A. (1988). Environmental mapping based on space information. Subsoil. [in Russian]
- Yakovleva, R. (2004). Questions of authorship applied to different stages of creating maps and times personal types of cartographic works. *Intellectual property. Copyright and related rights*, 9, 19–33. [in Russian]
- Yalovkina, L. (2020). On the results of developing a methodology for ensuring and controlling the quality of the design of a cartographic image. *Bulletin of SGUGIT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 25(1), 211–221. [in Russian]
- Yatsuhno, V.M., Mander, Y.E. (1995). Formation of agricultural landscapes and protection of the natural environment. Institute of Geology Sciences of the Academy of Sciences of the BSSR. [in Russian]
- Zatserkovny, V., Plichko, L., Prylipko, O., Nikolayenko, O., Muzhanova, T. (2020). Justification of the expediency of using geoinformation systems in landscape and ecological monitoring. *Visnyk of Taras Shevchenko Kyiv National University. Geology*, 1 (88), 98–105. [in Ukrainian]
- Zubretskaya, N.A. (2015). Structural modeling of production quality as a multidimensional object of measurement and management. *Technological audit and production reserves*, 22, 44–48. [in Russian]

Надійшла до редколегії 24.01.22

D. Liashenko, Dr. Sci (Geogr.), Asoc. Prof.,  
E-mail: uageog@gmail.com;  
I. Tsiupa, PhD (Geol.),  
E-mail: tsyupa@ukr.net;  
V. Babiy,  
E-mail: vitbabii@gmail.com;  
Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;  
V. Chekhniy, PhD (Geogr.),  
E-mail: chekhniy@gmail.com;  
Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
44 Volodymyrska Str., Kyiv, 01054, Ukraine

## GEOECOLOGICAL MAPS QUALITY ASSURANCE AT THE STAGES OF CREATION AND USE

*A geoecological maps quality assurance scheme during the map life cycle has been developed. The main methodological tools of research are conceptual modeling and the method of expert assessments. The work traces approaches to the formation of map quality concepts and their evaluation: utilitarianism, consequentialism, welfareism, the principle of ecological value. The importance of ensuring the quality of geoecological maps at all stages of the product's life cycle has been given. The main methodological technique is the developed algorithmic model. The approaches, algorithm and groups of criteria for the quality of geoecological maps researching are defined: the internal quality of map data (from the producer's point of view), indicators of the external quality of maps (from the consumer's point of view), in particular technological, consumer criteria, scientific and social value of maps. In the course of experimental studies, a methodology for evaluating a number of consumer characteristics of geoecological maps was proposed. The expert analysis of the factors affecting the assessment of maps quality has been conducted. The hierarchy of the factor importance is built in the following sequence: effective color use, sufficient contrast of the image, composition (size and placement of map elements), text on a map. The work formulates features of ensuring the quality of geoecological maps during their creation and increasing the efficiency of their use. Prospects for the further assurance development lie in the deepening of the integral theory of the assessment of the quality of maps focused on the application of a propositional scheme for the assessment of various groups of maps.*

*Keywords: map quality, social significance of maps, conceptual modeling, geoecology, geoecological maps.*

## ПОДІЇ

### ВІТАЄМО ІЗ 85-РІЧНИМ ЮВІЛЕЄМ ГЕОРГІЯ ТРОХИМОВИЧА ПРОДАЙВОДУ!

Колектив ННІ "Інститут геології" щиро вітає доктора фізико-математичних наук, професора, заслуженого діяча науки і техніки України Георгія Трохимовича Продайводу із 85-річним ювілеєм.

Георгій Трохимович народився 25 липня 1937 року у старовинному селі Митрофанівка Кропивницького району Кіровоградської області, коріння якого сягають середини XVIII століття. Його дошкільне дитинство припало на злиденні роки німецької окупації. У 1943 році село було звільнене радянськими військами, а він у 1944 році пішов у перший клас Митрофанівської середньої школи. Після закінчення 8-го класу Георгій Трохимович навчався на геофізичному відділенні Київського геологорозвідувального технікуму.

Після закінчення технікуму та служби в армії Георгій Трохимович навчався на геологічному факультеті Київського державного університету імені Т. Г. Шевченка, який з відзнакою закінчив у 1966 році за спеціальністю "Геофізичні методи пошуків та розвідки родовищ корисних копалин". Вся подальша більш ніж півсторічна науково-викладацька діяльність Георгія Трохимовича тісно пов'язана з Київським університетом ім. Тараса Шевченка.

Прагнення до експериментальних досліджень і узагальнень, до наукового підходу в роботі виявилось у Георгія Трохимовича, коли він почав працювати на посаді інженера у Проблемній лабораторії фізико-хімічних досліджень гірських порід, заснованій на геологічному факультеті у 1966 році проф. М. І. Толстим.

За короткий термін Георгій Трохимович створив низку апаратурних установок для вимірювання пружних параметрів та щільнісних характеристик мінералів і гірських порід. У цей час він бере безпосередню участь як в експедиційних роботах із відбору зразків новітніх вулканогенних порід Вірменії, так і у вимірюванні їхніх фізичних властивостей. Результати цих експериментальних досліджень та їх узагальнення лягли в основу його кандидатської дисертації "Фізичні властивості вулканічних порід і основні фактори, що їх визначають (на прикладі Вірменського нагір'я)", яку він захистив у 1971 році.

Протягом подальших років, працюючи старшим науковим співробітником Проблемної лабораторії, а згодом – асистентом і доцентом кафедри геофізичних методів пошуків і розвідки корисних копалин геологічного факультету, Георгій Трохимович проводить інтенсивні дослідження фізико-кристалохімічних аспектів фізичних параметрів мінералів у співпраці з академіком АН УРСР О. С. Поварених. Це дозволило йому отримати низку вагомих результатів із сейсмоакустики, петрофізики упорядкованого середовища та нелінійної геофізики. Закономірним підсумком цих досліджень стала його докторська дисертація "Теорія і методика комплексних досліджень тензорних фізичних характеристик упорядкованих середовищ", яку у 1991 році Георгій Трохимович блискуче захистив в Інституті фізики Землі ім. О. Ю. Шмідта. Він вперше довів широкі можливості застосування теорії стохастичних полів і методів теорії умовних функцій для дослідження ефективних геофізичних параметрів ієрархізовано субпідрядних реальних структур геологічного середовища.

Відмінною рисою характеру Георгія Трохимовича завжди була захопленість новими ідеями вкупі з наполегливістю і прагненням доводити думку і діло до логічного завершення, що сприяло успіху в усіх його справах і починаннях. Він вперше у світовій практиці запропонував і реалізував новий інваріантно-поляризаційний ультразвуковий метод визначення акустичних і пружних постійних текстур гірських порід за довільної орієнтації робочої системи координат та відсутності апріорної інформації про симетрію текстури.

З 1992 по 2002 рік Георгій Трохимович очолює кафедру геофізичних методів пошуків і розвідки родовищ корисних копалин, яку згодом, з його ініціативи, у 1993 році було перейменовано у кафедру геофізики. Останнє значно розширило сферу діяльності та позиціонувало кафедру як основний центр підготовки фахівців геофізичної спеціальності в Україні. У 1993 році Г. Т. Продайводи було присвоєно звання професора.

Період становлення незалежної України був пов'язаний із реформуванням системи вищої освіти. Георгій Трохимович був організатором створення навчально-методичного комплексу геофізичної спеціальності на рівні кращих світових зразків. Були розроблені нові навчальні плани підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів, а кафедра перейшла на триступеневу підготовку фахівців із геофізики. За його ініціативи й особистої участі вперше в Україні був виданий практично повний комплект україномовних підручників з основних геофізичних спеціальностей. Георгій Трохимович протягом багатьох років викладав навчальні дисципліни "Механіка суцільного середовища", "Фізика Землі", "Математичне моделювання геофізичних параметрів" та "Сейсмоакустика".



Слід також зазначити, що Георгій Трохимович був ініціатором створення у 1993 році філіалу кафедри геофізики при Інституті геофізики НАН України, який протягом багатьох років очолювали член-кореспондент НАН України О. М. Харитонов, а згодом – член-кореспондент НАН України О. В. Кендзера.



У науково-дослідній лабораторії

У 1995 році Георгій Трохимович створює і очолює науково-дослідну лабораторію теоретичної та прикладної геофізики. Основними напрямками її наукової діяльності стали геофізичний моніторинг небезпечних природних і природно-техногенних процесів, розроблення нових геофізичних технологій пошуків і розвідки корисних копалин, нелінійна геофізика, екологічна геофізика, геоінформатика і комп'ютерна геофізика.

Незважаючи на активну педагогічно-організаційну діяльність, Георгій Трохимович наполегливо продовжував працювати над розробкою кристалохімічних методів визначення пружних постійних мінералів та інваріантно-поляризаційного методу визначення пружних постійних гірських порід, а також сейсмомінералогічного методу глибинного картування природних і техногенних процесів. Йому належить відкриття явища інваріантності та розщеплення фазових швидкостей пружних хвиль у гірських породах. У 2001 році вийшла у світ фундаментальна монографія Г. Т. Продайводи у співавторстві з академіком РАН К. С. Александровим "Анізотропія пружних властивостей мінералів і гірських порід".

Георгій Трохимович також сприяв підготовці фахівців вищої кваліфікації. За його ініціативи після тривалої перерви при університеті було створено спецраду із захисту докторських і кандидатських дисертацій зі спеціальностей 04.00.25 "Геоінформатика" (1995) та 04.00.22 "Геофізика" (2001), яку він очолював багато років. Він особисто підготував 12 кандидатів та 1 доктора геологічних наук – Сергія Андрійовича Вижву, який протягом багатьох років завідував кафедрою геофізики, а наразі очолює Науково-навчальний інститут "Інститут геології" ( правонаступник геологічного факультету) Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Георгій Трохимович із 2002 року працював на посадах професора кафедри геофізики (2002–2007) та наукового консультанта (2007–2017). Він як фундатор наукової школи сейсмоакустики в Київському університеті продовжував розвиток тензорної петрофізики, математичного моделювання геофізичних параметрів, нелінійної геофізики та геофізики природних і техногенних катастроф.

Георгій Трохимович є прикладом невтомного науковця, автором та співавтором 24 патентів і більше 300 наукових праць. Він лауреат Премії імені Тараса Шевченка Київського національного університету, нагороджений Почесною грамотою Кабінету Міністрів України (2002), академічною нагородою імені Ярослава Мудрого та медаллю В. І. Лучицького. У 2009 році указом Президента України за визначні заслуги в педагогічній і науковій діяльності та видатний внесок у розвідку надр України йому було присвоєно почесне звання "Заслужений діяч науки і техніки України".

*Вітаємо шановного ювіляра! Бажаємо мирного неба, здоров'я Вам та Вашим близьким, творчої наснаги та здійснення бажань!*

**Колектив кафедри геофізики та ННІ "Інститут геології"**

### ВІТАЄМО ІЗ 75-РІЧНИМ ЮВІЛЕЄМ МИКОЛУ ВАСИЛЬОВИЧА РЕВУ!

М. В. Рева родом із села Коврай Золотоніського району Черкаської області. Народився 20 липня 1947 року в сім'ї колгоспників. У 1954 році вступив до Коврайської восьмирічної школи, яку закінчив із похвальною грамотою в 1962 році.

З 1962 по 1966 рік навчався у Київському геологорозвідувальному технікумі, який закінчив із відзнакою у 1966 році за спеціальністю "Геофізичні методи пошуків і розвідки корисних копалин" із кваліфікацією "технік-геофізик". У 1966 році вступив до Київського державного університету імені Т. Г. Шевченка на геологічний факультет, у 1971 році отримав червоний диплом зі спеціальності "Геофізичні методи пошуків і розвідки родовищ корисних копалин" та кваліфікацію "геолог-геофізик".

Трудова діяльність Миколи Васильовича повністю пов'язана з Київським національним університетом імені Тараса Шевченка. Тут він відпрацював 51 рік! На геологічному факультеті з 1971 року він був на посадах інженера, старшого інженера наукової групи (1971–1976), асистента кафедри геофізики (1976–1986), молодшого наукового співробітника науково-дослідної частини (1987–1990), наукового співробітника науково-дослідної лабораторії теоретичної та прикладної геофізики кафедри геофізики (1990–1997). Під час роботи в НДЧ Миколою Васильовичем були розроблені нові алгоритми індукційного аналізу перехідних процесів, що базуються на інтегральних часових характеристиках імпульсів становлення поля, які дозволяють виконувати індукційний аналіз нестационарних електромагнітних полів у довільній просторово-часовій області джерела збудження. Ці дослідження стали основою кандидатської дисертації "Індукційний та кінематичний аналіз нестационарних електромагнітних полів у геоелектриці" під керівництвом професора Грози Анатолія Аркадійовича. Її блискучий захист відбувся у 1997 році в Інституті геофізики імені С. І. Субботіна НАН України з отриманням ступеня кандидата фізико-математичних наук. Всього трьох статей забракло, щоб дисертацію зарахувати як докторську. Наукові розробки М. В. Реви впроваджені в Україні, Росії і Туркменістані. З 1997 року і понині він доцент кафедри геофізики геологічного факультету, який 2014 року реорганізовано у ННІ "Інститут геології". У 2000 році Миколі Васильовичу присвоєно вчене звання доцента кафедри геофізики. У 2007–2008 роках він виконував обов'язки завідувача кафедри геофізики. М. В. Рева завжди дуже відповідально ставився до керівництва дипломними та курсовими роботами студентів кафедри. Його підпис на титульній сторінці – це завжди знак високої якості роботи!



Студентські роки

Микола Васильович зробив значний внесок у геофізичну освіту. У співавторстві з колегами він підготував цілу низку навчальних книг, зокрема підручники "Основи геофізики" (2006), "Електрометрія" (2014), "Теорія поля" (2014), "Інженерна геофізика" (2018) та навчальний посібник "Електрометрія. Посібник з геофізичної практики" (2014). Як давній працівник факультету і майстер художнього слова, М. В. Рева долучився до написання книги "Історія геології у Київському університеті" (2011).

Доцент М. В. Рева на високому рівні викладає нормативні дисципліни "Теорія поля", "Електрометрія", "Електрометрія та обробка даних" і спецкурси "Обробка електромагнітних полів на ЕОМ", "Рудна електророзвідка", "Інтерпретація даних електрометрії".

Чимало часу Микола Васильович віддав громадській діяльності. Він упродовж 10 років (1997–2007) виконував обов'язки вченого секретаря кафедри, є одним із головних розробників навчальних планів підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів із геофізичної спеціальності. Брав активну участь у роботі щорічних міжнародних наукових конференцій "Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища", де керував роботою секції "Електромагнітний моніторинг – геоелектрика, електророзвідка, електричний каротаж, електромагнітне просвічування".

М. В. Рева – знаний фахівець із теоретичних і прикладних проблем електромагнітних досліджень земних надр. Автор та співавтор біля 130 публікацій, у тому числі 3 підручників, 8 навчальних посібників (з них 3 англомовні), 3 монографій. Монографії і сім навчальних посібників видані в Казахстані в рамках співробітництва Київського національного університету імені Тараса Шевченка з Карагандинським технічним університетом імені Абилкаса Сагінова. Під керівництвом М. В. Реви захищено дві кандидатські дисертації (В. І. Онищук, Я. М. Глоба).

У 2002 році Микола Васильович нагороджений Почесним знаком "Відмінник освіти України", у 2004 році – Срібним значком Співки геологів України. У його здобутку – чотири грамоти ректора університету, подяка голови Київської державної адміністрації (2009). Він також нагороджений відомчою заохочувальною відзнакою – медаллю Л. І. Лутугіна Державної геологічної служби України (2009). У 2017 році відзначений нагрудним знаком "Василь Сухомлинський" МОН України. Відзначений грамотою ректора Карагандинського державного технічного університету за розвиток співпраці між навчальними закладами України і Казахстану. У 2021 році за багаторічну сумлінну працю, вагомий особистий внесок у підготовку висококваліфікованих спеціалістів та плідну науково-педагогічну діяльність нагороджений нагрудним знаком МОН України "За наукові та освітні досягнення".

Микола Васильович – чудовий сім'янин. Разом із дружиною Зоєю, яку зустрів на кафедрі геофізики, вони виростили сина Олега і доньку Олену, яка у 2007 році закінчила геологічний факультет за спеціальністю "Геохімія, мінералогія та петрографія".

*Вітаємо шановного ювіляра! Бажаємо миру, міцного здоров'я та сімейного затишку! Нехай завжди Вас супроводжують натхнення, успіх у справах та втілення мрій!*

**Колектив кафедри геофізики та ННІ "Інститут геології"**

Наукове видання



**ВІСНИК**

**КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ГЕОЛОГІЯ**

**Випуск 4(99)**

**Комп'ютерна обробка статей О. Козіонова  
Computer processing of the articles by O. Kozionova**

**Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"**

Opinions, statements, accuracy of the quotations, economic and statistical data, terminology, proper names and other information are made on the responsibility of the authors. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit the submitted materials.

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, відповідної галузевої термінології, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали.



Формат 60x84<sup>1/8</sup>. Ум. друк. арк. 11,5. Наклад 300. Зам. № 222-10540.  
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл4.  
Підписано до друку 30.12.22

Видавець і виготовлювач  
ВПЦ "Київський університет"  
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030  
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 72; тел./факс (38044) 239 31 28  
E-mail: vpc\_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua  
http: vpc.knu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02