

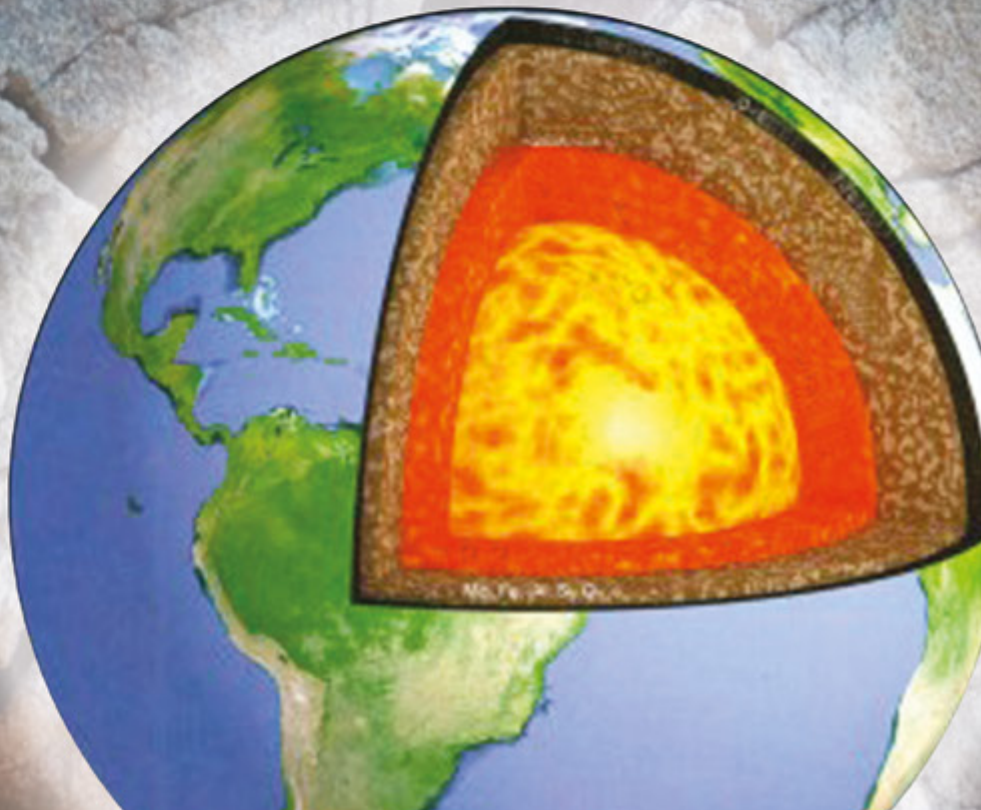
ISSN 1025-6814 (Print)
ISSN 2522-4107 (Online)

ГЕОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ



GEOLOGIČNÍJ ŽURNAL

2 (383)
2023



ЗАСНОВНИКИ:

Національна академія наук України
Інститут геологічних наук НАН України

ВИДАВЕЦЬ:

Інститут геологічних наук НАН України

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

КЛИМЧУК О.Б. (Інститут геологічних наук
НАН України, Київ, Україна)

Заступник головного редактора

НЕМИРОВСЬКА Т.І. (Інститут геологічних наук
НАН України, Київ, Україна)

АНИСТРАТЕНКО О.Ю. (Інститут зоології
ім. І. І. Шмальгаузена НАН України, Київ, Україна)

БАЯРИ С. (Університет Хасеттепе, Анкара, Туреччина)

БУГАЙ Д.О. (Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна)

ГІНТОВ О.Б. (Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна
НАН України, Київ, Україна)

ДИКАНЬ Н.І. (Інститут геологічних наук
НАН України, Київ, Україна)

ДУБЛЯНСЬКИЙ Ю.В. (Інститут геології і палеонтології
Університету Інсбрука, Інсбрук, Австрія)

КОМАР М.С. (Національний науково-природничий
музей НАН України, Київ, Україна)

КРИВДІК С.Г. (Інститут геохімії, мінералогії та
рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ,
Україна)

МАЛИК ПИТЕР (Відділ гідрогеології та геотермальної
енергії Геологічної служби Словацької Республіки,
Братислава, Словацька Республіка)

МАРКС ЛЕШЕК (Варшавський університет, Варшава,
Польща)

ОЛЬШТИНСЬКА О.П. (Інститут геологічних наук
НАН України, Київ, Україна)

ПЕРИТ ТАДЕУШ МАРЕК (Державний геологічний
інститут, Варшава, Польща)

РІДУШ Б.Т. (Чернівецький національний університет
ім. Федьковича, Чернівці, Україна)

РЯБОКОНЬ Т.С. (Інститут геологічних наук
НАН України, Київ, Україна)

ТЕМОВСКИ М. (Дослідницький центр ізотопної
кліматології та навколишнього середовища Інституту
ядерних досліджень Угорської Академії наук, Дебрецен,
Угорщина)

ШЕСТОПАЛОВ В.М. (Інститут геологічних наук
НАН України, Київ, Україна)

ШЕХУНОВА С.Б. (Інститут геологічних наук
НАН України, Київ, Україна)

FOUNDERS:

National Academy of Science of Ukraine
Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine

EDITOR:

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

KLIMCHOUK O.B. (Institute of Geological Sciences of
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

Deputy Editor-in-Chief

NEMYROVSKA T.I. (Institute of Geological Sciences of
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

ANISTRATENKO O.Yu. (I.I. Schmalhausen Institute of
Zoology of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

BAYARI S. (Hacettepe University, Ankara, Turkey)

BUGAY D.O. (Institute of Geological Sciences of
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

GINTOV O.B. (S.I. Subbotin Institute of Geophysics of
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

DYKAN N.I. (Institute of Geological Sciences of NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine)

DUBLYANSKY Yu.V. (Institute of Geology and
Palaeontology, Innsbruck University, Innsbruck, Austria)

KOMAR M.S. (National Museum of Natural History of
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

KRYVDIK S.G. (M.P. Semenenko Institute of
Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine)

MALIK PETER (Department of Hydrogeology &
Geothermal Energy, ŠGÚDŠ — Geological Survey of Slovak
Republic, Bratislava, Slovak Republic)

MARKS LESZEK (University of Warsaw, Warsaw, Poland)

OLSHTYNSKA O.P. (Institute of Geological Sciences of
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

PERYT TADEUSZ MAREK (State Geological Institute,
Warsaw, Poland)

RIDUSH B.T. (Fedkovich Chernivtsy National University,
Chernivtsy, Ukraine)

RYABOKON T.S. (Institute of Geological Sciences of
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

TEMOVSKI M. (Isotope Climatology and Environmental
Research Centre, Institute for Nuclear Research, Debrecen,
Hungary)

SHESTOPALOV V.M. (Institute of Geological Sciences of
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

SHEKHUNOVA S.B. (Institute of Geological Sciences of
NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine)

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
серія КВ № 13744-2718 ПР від 28.02.2008 р.

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції серія ДК № 4631 від 14.10.2013 р.

ГЕОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ



GEOLOGIČNIJ ŽURNAL

2 (383) 2023

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
ЗАСНОВАНИЙ
У БЕРЕЗНІ 1934 РОКУ
ВИХОДИТЬ 4 РАЗИ НА РІК
КИЇВ

ЗМІСТ

Втрати науки

Пам'яті видатного вченого-спелеолога, головного редактора «Геологічного журналу» Олександра Борисовича Климчука (29 серпня 1956 – 12 травня 2023)..... 3

Дослідницькі та оглядові статті

Кирилюк В.П., Гайовський О.В. Регіональний метаморфізм і стратиграфія фундаменту Українського щита. Стаття 3. Особливості літогенезу і метаморфізму ранньодокембрійських комплексів та їхня тривалість..... 13

Льота Н.Г., Саніна І.В. Просторово-часові особливості змін хімічного складу вод безнапірних водоносних горизонтів у четвертинних відкладах басейну Дніпра 30

Шпак О.М., Гаврилюк Р.Б., Логвиненко О.І., Запольський І.М. Оцінка впливу коливань рівня ґрунтових вод на трансформацію нафтопродуктового забруднення підземного середовища..... 40

Мартышин А.І. *Tymkivia primitiva* gen. nov. sp. nov. – новий вид скам'янілостей з відкладів канилівської серії пізнього едіакарію (венду) Поділля, Україна... 58

Гіпотези. Дискусії. Рецензії

Наумко І.М. Підсумкове видання з історії мінералогії і мінералогічних знань в Україні 68

CONTENTS

Losses of science

In memoriam of Alexander Klimchouk, prominent scientist in speleogenesis, Editor-in-Chief of the “Geological Journal” / “Geologičnij žurnal” (August 29, 1956 – 12 May, 2023) 3

Research and review papers

Kyrylyuk V.P., Gaiovskyi O.V. Regional metamorphism and stratigraphy of the basement of the Ukrainian Shield. Article 3. Features of lithogenesis and metamorphism of the Early Precambrian complexes and their duration 13

Lyuta N.G., Sanina I.V. Spatial and temporal features of water chemistry changes in the quaternary unconfined aquifers of the Dnipro River basin 30

Shpak O.M., Havryliuk R.B., Lohvynenko O.I., Zapol'skiy I.M. Assessment of the impact of groundwater table fluctuations on the transformation of subsurface contamination with petroleum products 40

Martyshyn A.I. *Tymkivia primitiva* gen. nov. sp. nov., a new type of fossils from the Late Ediacaran (Vendian) Kanylivka Group in Podolia, Ukraine 58

Hypotheses. Discussion. Reviews

Naumko I.M. Final edition on the history of mineralogy and mineralogical knowledge in Ukraine 68

Адреса редакції:

01601 Київ-54, вул. О. Гончара, 55-б
Інститут геологічних наук НАН України
Тел: 486-38-76
E-mail: geojournal@igs-nas.org.ua

Відповідальний секретар *Н.І. Дугіна*
Редактор *І.І. Сміль*

Технічний редактор *С.О. Шадріна*
Комп'ютерна верстка *Н.К. Резнік*

Підп. до друку ***.**.2023* р. Формат 60 × 84/8.
Гарн. *Minion Pro*. Ум. друк. арк. 00,00. Обл.-вид. арк. 00,00.
Тираж 100 пр. Зам. № 0000

Тираж виготовлено

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи серії ДК №

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.282086>
УДК 55(092)

**Пам'яті видатного вченого-
спелеолога, головного
редактора «Геологічного
журналу» Олександра
Борисовича Климчука
(29 серпня 1956 – 12 травня 2023)**

**In memoriam of Alexander
Klimchouk, prominent scientist
in speleogenesis, Editor-in-
Chief of the “Geological
Journal” / “Geologicnij žurnal”
(August 29, 1956 – May 12, 2023)**

Статтю присвячено пам'яті видатного дослідника геоморфології та еволюції карсту, походження та розвитку природних печер, ученого-гідрогеолога, спелеолога, лауреата Державної премії України у галузі науки і техніки (2011), доктора геологічних наук (2014), члена-кореспондента НАН України (2018), ініціатора створення та очільника у 2006–2014 рр. науково-дослідного центру «Український Інститут спелеології і карстології» при Таврійському національному університеті ім. В.І. Вернадського, головного наукового співробітника Інституту геологічних наук НАН України, головного редактора «Геологічного журналу» Олександра Борисовича Климчука.

Ключові слова: Олександр Борисович Климчук; карст; спелеогенез; «Геологічний журнал»; Інститут геологічних наук НАН України.

The article is devoted to the blessed memory of Alexander Borysovych Klimchouk, the outstanding researcher of geomorphology and evolution of karst, origin and development of natural caves, hydrogeologist, speleologist, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology (2011), Doctor of Geological Sciences (2014), Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine (2018), initiator and head (in 2006–2014) of the Ukrainian Institute of Speleology and Karstology at the V.I. Vernadsky Tauride National University, Chief Research Scientist of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Editor-in-Chief of the “Geological Journal”.

Keywords: Alexander Borysovych Klimchouk; karst; speleogenesis; “Geological Journal”; Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Цитування: Пам'яті видатного вченого-спелеолога, головного редактора «Геологічного журналу» Олександра Борисовича Климчука (29 серпня 1956 – 12 травня 2023). *Геологічний журнал*. 2023. № 2 (383). С. 03–12. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.282086>

Citation: In memoriam of Aleksander Klimchouk, prominent scientist in speleogenesis, Editor-in-Chief of the "Geological Journal" / "Geologicnij zurnal" (August 29, 1956 – May 12, 2023). 2023. *Geologicnij žurnal*, 2 (383): 03–12. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.282086>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NG-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

12 травня 2023 р. на 67-му році внаслідок важкої хвороби пішов із життя всесвітньо відомий учений-гідрогеолог, геоморфолог, дослідник геології карсту і печер, доктор геологічних наук, член-кореспондент НАН України, головний науковий співробітник Інституту геологічних наук НАН України, головний редактор «Геологічного журналу» Олександр Борисович Климчук.

On May 12, 2023, at the age of 66, Alexander Klimchouk, world-famous hydrogeologist, geomorphologist, scientist in karst geology and explorer of caves, Chief Researcher of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences (NAS) of Ukraine, Editor-in-Chief of the "Geological Journal" / "Geologičnij žurnal", Doctor of Geological Sciences, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, passed away due to a deadly disease.



Гірський масив Арабіка, Західний Кавказ, 2004 р.
Arabica massif, the Western Caucasus, 2004

Олександр Борисович Климчук народився 29 серпня 1956 р. у м. Одеса. У 1983 р. закінчив географічний факультет Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка, здобувши кваліфікацію географа-геоморфолога. Ще з юнацьких років він захопився дослідженнями карстових печер, в яких почав брати участь з 1968 р. З 17 років став працювати техніком в Інституті геологічних наук АН України у Києві. Експедиційні дослідження печер і карсту, що розпочиналися з України (Поділля, Крим, Донбас) та Кавказу, з часом охопили інші карстові регіони планети – в Євразії, Африці, Північній та Південній Америці.

Alexander Borysovych Klimchouk was born on August 29, 1956 in Odesa. In 1983, he graduated from the Department of Geography at Taras Shevchenko National University of Kyiv, being qualified as geographer-geomorphologist. Yet, in his youth, he became interested in the exploration of karst caves, in which he was involved since 1968, and from the age of 17 he worked as a technician at the Institute of Geological Sciences in Kyiv. Expeditionary studies of caves and karst, which were started in Ukraine in the regions of Podillia, Crimea, Donbas, and in the Caucasus, eventually spread to other karst regions of the planet – Eurasia, Africa, North and South America.

Під час навчання в університеті, на основі польових спелеологічних спостережень у районах високогірського карсту Середньої Азії, Олександр звернув увагу на особливу роль приповерхневої (епікарстової) зони у перерозподілі метеорних вод, еволюційним наслідком чого була характерна морфологія поверхневих утворень та специфіка вертикально-каналового живлення підземних порожнин. Продовження спостережень в інших районах згодом слугували підставою для опрацювання цілісної концепції епікарсту, представлені у ряді статей та монографії.

While studying at the university, due to field speleological observations in the highland karst regions of Central Asia, Alexander noticed the special role of near-surface (epikarst) zone in the redistribution of meteoric water, whose evolutionary consequence was the characteristic morphology of surface formations and the specifics of vertical-channel feeding of underground cavities. Continued observations in other areas led to the development of a holistic epikarst concept, presented in a number of articles and a monograph.



Спуск у печері на плато Кирктау, Узбекистан, 1973 р.
Descent into a cave on the Kirktau plateau, Uzbekistan, 1973



Печера Атлантида на Поділлі, весілля Олександра та Наталії Климчуків, 1975 р.
Atlantida Cave in Podillia, wedding of Alexander and Nataliya Klimchouk, 1975

Пізніше (1985–1990 рр.), базуючись на розроблених в Інституті геологічних наук НАН України закономірностях водообміну в артезіанських системах, Олександр Климчук обґрунтував принципово нову – артезіанську модель походження та розвитку найбільших у світі гіпсових лабіринтових печер Лівобережного Придністров'я. Модель склала основу для зміни поглядів на особливості водообміну в міоценовому водоносному комплексі південно-західної частини Волино-Подільського артезіанського басейну, нового розуміння формування сірчанних родовищ Передкарпаття, базисом для регіональної та локальних оцінок швидкості розвитку карсту і карстової небезпеки.

Later (1985–1990), relying on the patterns of water exchange in artesian systems, which were revealed by researchers of the NAS Institute of Geological Sciences, Alexander Klimchouk substantiated a fundamentally new artesian model of the origin and evolution of the world's largest gypsum labyrinth caves in left-bank Transnistria. The model led to reconsidering water-exchange peculiarities in the Miocene aquifer complex of the southwestern part of the Volyn-Podilskyi artesian basin, generated new insights into the formation of sulphur deposits in the Precarpathian region, and became the basis for regional and local assessments of the karst development rate and karst hazard.

Працюючи над питаннями спелеогенезу і карстоутворення у гіпсах і ангідридах, дослідник, перебуваючи на стажуванні в Італії (Університет Падуї), ініціював міжнародний проєкт із глобального узагальнення даних про гіпсовий карст, за підсумками якого під його, у тому числі, редакцією було підготовлено й видано монографію «Гіпсовий карст світу» (1996).

У 1980-х роках Олександр Борисович обґрунтував імовірність знаходження найглибшої карстової печери світу на масиві Арабіка (Західний Кавказ) та започаткував широкомасштабні спелеорозвідувальні роботи у цьому регіоні. 1984 року організований ним експеримент із трасування підземних вод у цьому масиві довів існування тут глибокої карстової гідрогеологічної системи з амплітудою понад 2300 м. У 2001 р. експедиція Української Спелеологічної Асоціації (УСА) відкрила на цій території нову перспективну щодо глибинного розвитку печерну систему (Крубера-Вороняча). Цього ж року Олександр Климчук започаткував дослідницький проєкт УСА «Поклик Безодні», метою якого було спелеологічне досягнення рекордної у глобальному масштабі глибини – понад 2000 м. У наступні роки цей проєкт отримав підтримку Національного географічного товариства США та спонсорінг від журналу «National Geographic». У 2004 р. мети проєкту було досягнуто в печері Крубера-Вороняча. Послідуючи експедиції УСА довели глибину цієї печери до майже 2200 м, що журнал «National Geographic» назвав одним із найвизначніших географічних відкриттів за минулі 100 років.

Олександром Климчуком розроблено теорію гіпогенного карстоутворення, згідно з якою масив карстується знизу – без прямого зв'язку з поверхневим живленням у напірних водоносних комплексах і тріщинно-жильних системах під дією висхідного крізьпластового та крізьформаційного водообміну. Учений розробив спелеогенетичний підхід до еволюції карсту, який визначає роль карстової порожнинності різного походження у формуванні гідрогеологічних та інженерно-геологічних властивостей територій розповсюдження розчинних порід. Ці розробки, представлені у багатьох статтях у міжнародних журналах і трьох виданих у США англійських монографіях, отримали широке міжнародне визнання.

Doing research addressing speleogenesis and karst development in gypsum and anhydrite formations while on an internship in Italy (the University of Padua), he initiated an international project on the global synthesis of data on gypsum karst, which resulted in the preparation and publication of the monograph “Gypsum Karst of the World” (1996).

In the 1980-ies, Alexander Klimchouk substantiated the possibility of discovering the deepest karst cave in the world in the Arabika massif (the Western Caucasus) and launched large-scale speleological survey in the region. In 1984, an experiment on groundwater tracing in that massif, organized by him, proved the existence of a deep karst hydrogeological system with the amplitude of over 2300 m. In 2001, an expedition of the Ukrainian Speleological Association discovered a new cave system (Krubera-Voroniacha) which showed promise in terms of the cave system stretching in depth. In the same year, in the framework of the research project “Call of the Abyss”, supervised by the Ukrainian Speleological Association, Alexander Klimchouk launched exploration aiming at reaching the world-first speleologically record depth of over 2000 m. In the following years, this project won support from the US National Geographic Society and sponsorship from “National Geographic” magazine. In 2004, the project goal was achieved in the Kruber-Voroniacha cave. Subsequent expeditions of the Ukrainian Speleological Association showed the depth of this cave to be nearly 2200 m, which “National Geographic” called one of the most significant geographical discoveries of the past 100 years.

Alexander Klimchouk developed the theory of hypogene karst formation: according to it the massif is karstified without a direct connection with surface feeding in pressure aquifer complexes and fissure-vein systems under the action of upward through-layer and through-formation water exchange. The scientist proposed a speleogenetic approach to the evolution of karst, which determines the role of karst cavities of various origins in the formation of hydrogeological and engineering-geological properties of areas with soluble rocks occurrence. These concepts, presented in numerous articles in international journals and three English-language monographs published by the Ukrainian Speleological Association, won wide international recognition.



Карстовий масив Аладаглар, Туреччина, 2003 р.
Karst massif Aladaglar, Turkey, 2003



Лекція Олександра Климчука у Бразилії, 2008 р.
Alexander Klimchouk's lecture in Brazil, 2008



Національний парк «Вітряна печера», США, 1990 р.
Wind Cave National Park, USA, 1990

Без перебільшення можна констатувати, що теоретичні роботи та спелеологічні відкриття Олександра Климчука суттєво змінили погляди на умови розвитку карсту та спелеогенез, сприяли значному розширенню уявлень про закономірності еволюції карстових порожнин, печер і карсту взагалі починаючи з ініціальних стадій. Вони стали основою для розроблення нових підходів до пов'язаних із карстом практичних проблем і були визнані Президією НАН України (Постанова № 243 від 27.09.2017 р.) одним із пріоритетних напрямів фундаментальних і прикладних досліджень наукових установ Відділення наук про Землю НАН України.

ISSN 1025-6814. *Geologičnij žurnal*. 2023. № 2

It is no exaggeration to state that Aleksander Klimchouk's theoretical work and speleological discoveries significantly changed the views on the conditions of karst development and speleogenesis, and led to a significantly broader understanding of the patterns of evolution of karst cavities, caves and karst in general, starting from the initial stages. They became the basis for elaborating new approaches to karst-related practical issues and were recognized by the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine (Resolution No. 243 of September 27, 2017) as one of the priority areas of basic and applied research of scientific institutions of the NAS Department of Earth Sciences.



Крим, Україна, 2012 р.
Crimea, Ukraine, 2012

У 2014 р. російська окупація Кримського півострова змусила Олександра Климчука залишити Крим, де він у 2006 р. створив та очолював науково-дослідний центр «Український Інститут спелеології і карстології» при Таврійському національному університеті ім. В.І. Вернадського. Повернувшись до Києва і працюючи в Інституті геологічних наук, Олександр Климчук присвятив себе координації досліджень гіпогенного карсту світу, результатом яких стала монографія «Hypogene Karst Regions and Caves of the World» (2017), опублікована видавництвом Springer.

Від початку віроломного російського вторгнення в Україну у лютому 2022 р. Олександр Климчук активно включився у боротьбу з агресором на науково-інформаційному фронті. Завдяки його науковому авторитету та активній громадянській позиції низка провідних міжнародних наукових організацій рішуче засудила агресію та підтримала Україну в її протистоянні російській навалі. Серед них – Міжнародний Спелеологічний Союз, Британська Спелеологічна Асоціація та Британська Асоціація Дослідження Печер. Остання закликала до негайного припинення бойових дій та вперше в своїй історії присудила звання довічного Почесного члена Асоціації іноземному вче-



Революція гідності, 2013 р.
Revolution of Dignity, 2013

In 2014, Russian aggression forced Alexander Klimchouk to leave the occupied Crimea, where in 2006 he had set up and, before the annexation, had headed the research center "Ukrainian Institute of Speleology and Karstology" at V.I. Vernadsky Tavri-da National University. Returning to the Institute of Geological Sciences, Alexander Klimchouk devoted himself to coordinating research on the hypogene karst of the world, which resulted in the monograph "Hypogene Karst Regions and Caves of the World" (2017), published by Springer Nature Group.

Since the beginning of russia's perfidious invasion of Ukraine in February 2022, Alexander Klimchouk was actively involved in the fight against the aggressor on the scientific and information fronts. Thanks to his authority in science and active civic position, a num-

ному – Олександру Климчуку, за величезний внесок у світову науку в дослідженнях печер і карсту, а також як свідчення поваги Асоціації до мужньої позиції українського народу в його боротьбі з російським агресором. Геологічне товариство США (Відділ Карсту), у свою чергу, нагородило Олександра Климчука спеціальною відзнакою – за фундаментальний внесок у дослідження карсту та печер. Внесок О. Климчука у світову науку був доцінений також Угорським спелеологічним товариством, яке обрало його своїм Почесним членом.

Олександр Климчук був найбільш цитованим українським вченим у галузі наук про Землю та одним із найбільш цитованих учених в Україні загалом. Його статті щороку публікувалися у відомих наукових журналах світу, а сам він був членом редколегій ряду таких міжнародних високореєтингових видань, як «International Journal of Speleology», «Mediterranean Geoscience Reviews», «Theoretical and Applied Karstology» та ін.

Олександр Климчук є автором і редактором понад 300 наукових праць, зокрема 14 монографій (сім з них видано за кордоном), 70 статей у фахових наукових виданнях України та інших держав (із них 45 статей – у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз «Scopus» і «Web of Science»), численних розділів у монографіях і статей в енциклопедичних виданнях.

Олександр Климчук приділяв значну увагу організаційній підтримці вітчизняної науки. З 2021 р. він був головним редактором найстарішого українського геологічного видання – «Геологічного журналу», забезпечивши його високий науковий статус.

У 2017–2021 рр. учений був членом першого складу Наукового Комітету Національної ради з розвитку науки та технологій, а у 2019–2021 рр. – заступником голови Комітету. При розгляді складних питань щодо організації і фінансування науки завжди займав активну принципову позицію, боровся з проявами корупції в науці. Як член спецрад із захисту дисертацій з гідрогеології й інженерної геології та літології вдумливо аналізував наукові здобутки дисертантів, робив зважені висновки щодо їх обґрунтованості і наукової цінності.

ber of leading international scientific organizations strongly condemned the aggression and supported Ukraine in its opposition to the Russian invasion. Among them are the International Union of Speleology, the British Caving Association and the British Cave Research Association. The latter called for an immediate cessation of hostilities and, for the first time in its history, awarded the title of Life Honorary Member of the Association to a foreign scientist – Alexander Klimchouk, for his tremendous contribution to world science in the exploration of caves and karst, as well as a testimony to the Association's respect for the courageous position of Ukrainian people in their fight against the Russian aggressor. The US Geological Society (Karst Division), in turn, honored Alexander Klimchouk with a special award for his fundamental input to the study of karst and caves. Alexander Klimchouk's contribution to world science was also recognized by the Hungarian Speleological Society, which elected him its honorary member.

Alexander Klimchouk was the most cited Ukrainian scientist in the field of Earth sciences and one of the most cited scientists of Ukraine in general. His articles were published every year in the world's top-rated scientific journals, and he himself was a member of the editorial boards of international high-reputation editions – "International Journal of Speleology", "Mediterranean Geoscience Reviews", "Theoretical and Applied Karstology" etc.

He is the author and editor of more than 300 scientific works, in particular, 14 monographs (seven of those were published abroad), 70 articles in specialized scientific editions of Ukraine and other countries (45 of them were published in the journals included in the international scientometric bases Scopus and Web of Science), he authored numerous chapters in monographs and encyclopedia articles.

Alexander Klimchouk gave much effort to organizational support for national science. Since 2021, he was the Editor-in-Chief of the oldest Ukrainian geological periodical – "Geological Journal", ensuring its high scientific status.

In 2017–2021, he was a member of the first Scientific Committee of the National Council for the Development of Science and Technology, and in 2019–2021 – the Deputy Chairman of the Committee. When considering complex issues related to the science administration and funding, he always took an active principled position and fought for academic integrity in science. As a member of specialized councils for defending dissertations in hydrogeology and engineering

Наукова та громадська активність Олександра Климчука високо оцінювалась також в Україні. Він був лауреатом Державної премії України у галузі науки і техніки (2011), відзначений Почесною грамотою НАН України за багаторічну плідну наукову працю (2016) та нагороджений Відзнакою НАН України за професійні здобутки (2021).

До останніх днів свого життя вчений вів активну наукову діяльність. Смертельна хвороба застала його в Університеті Манчестера (Великобританія), який надав йому грант на проведення досліджень у карстовому районі District Peak у самому центрі країни. Незважаючи на важкі прояви хвороби, встиг разом з британськими колегами виконати останні у своєму житті польові дослідження карсту.

Спелеологія у широкому розумінні слова – пошуки і відкриття печер, організація та проведення спелеологічних досліджень, всебічне вивчення, ефективна охорона та практичне використання підземних порожнин – була життєвою пасією Олександра Борисовича, якій він посвятив себе усього без залишку. Разом з дружиною – Наталією Климчук (Яблоковою), «печерного бацила» він защепив своїм дітям та онукам, які також захоплюються спелеологією та активно діють на ниві дослідження печер.

geology, as well as lithology and marine geology, he thoughtfully analyzed the scientific achievements of the degree applicants, made balanced conclusions concerning the validity and scientific relevance of their works.

Aleksander Klimchouk's scientific and public activities were also highly appreciated in Ukraine. He was a laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology (2011), a recipient of the diploma of the National Academy of Sciences of Ukraine for many years of fruitful work in science (2016) and was awarded with the distinction of the National Academy of Sciences of Ukraine for professional achievements (2021).

Until the last days of his life, he was an active researcher. His fatal illness overtook him at the University of Manchester (UK), which gave him a grant to conduct research in the District Peak karst area in the heart of the country. Despite the severe manifestations of the disease, he managed to carry out his last field studies of karst together with British colleagues.

Speleology in the broad sense of the word – searching for and discovering caves, organizing and conducting speleological research, comprehensive study, effective protection and practical use of underground cavities – was the life passion of Aleksander Borysovych, to which he devoted himself without reserve. Together with his wife, Natalia Klimchuk (Yablokova), he passed the "cave bacillus" on to his children and grandchildren, who are also fond of caving and are active cave explorers.



Перуанські Анди, 2018 р.
Peruvian Andes, 2018



Великобританія, 2023 р.
Great Britain, 2023



Олександр Климчук з онуками на своєму дні народження, 2012 р.
Alexander Klimchouk with his grandchildren on his birthday, 2012

Варто зазначити, що Олександр Климчук був сильною, чесною і принциповою людиною. Ніколи не піддавався кон'юнктурним спокусам часів та обставин, завжди тримався обраного ще у молодому віці життєвого курсу та поглядів. Не любив фальшу, але високо цинив у людях відданість справі та вірність слову. Був людиною з незламним характером. Некрологи часто починаються фразою: «По довгій боротьбі програв з хворобою...». До Олександра Борисовича це не відноситься. Усвідомлюючи свій стан здоров'я та ситуації, перемагаючи біль, працював до останніх днів свого життя, заспокоюючи рідних та друзів, що «все під контролем». Відійшов з честю – як переможець. Таким залишиться назавжди у пам'яті його колег та друзів.

Олександр Климчук – вчений із світовим ім'ям, особистість найвищих моральних якостей. Саме такі люди рухають людство вперед, відкриваючи нові горизонти знань і можливостей людського духу. Непоправна втрата для України та світової науки. Пам'ять про Олександра Борисовича залишиться навіки у його визначному та унікальному науковому спадку.

Наукова громадськість, колеги, послідовники, учні та друзі глибоко сумують з приводу смерті Олександра Климчука та висловлюють щирі співчуття його родині і близьким.

*Редколегія «Геологічного журналу»,
Інститут геологічних наук НАН України,
колеги, друзі*

It should be noted that Alexander Borisovich was a strong, honest and principled man. He never succumbed to the opportunistic temptations of the times and circumstances, always sticking to the life course and views he had chosen at a young age. He did not like falsity, but highly valued people's dedication and fidelity to their words. He was a man of unbreakable character. Obituaries often begin with the phrase: "After a long struggle, he lost his battle with the disease...". This does not apply to Alexander Klimchouk. Being fully aware of his situation, overcoming the pain, he worked till the last days of his life, reassuring his family and friends that "everything was under control". He died with honor – as a winner. He will always be remembered as such by his colleagues and friends.

Alexander Klimchouk was a scientist with a world name, a person of the highest moral qualities. It is such people who move humanity forward by opening up new horizons of knowledge and the possibilities of the human spirit. It is an irreparable loss for Ukraine and for world science. The memory of Alexander Borysovych will remain forever in his outstanding and unique scientific legacy.

The entire scientific community, colleagues, followers, students and friends are deeply saddened by the death of Alexander Klimchouk and express their condolences to his family and relatives.

*Editorial Board of the "Geological Journal",
Institute of Geological Sciences of the National
Academy of Sciences of Ukraine, colleagues, friends*

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.262163>
УДК 551.71/552.163(477)

Регіональний метаморфізм і стратиграфія фундаменту Українського щита. Стаття 3. Особливості літогенезу і метаморфізму ранньодокембрійських комплексів та їхня тривалість

В.П. Кирилюк*, О.В. Гайовський

Львівський національний університет ім. Івана Франка, Львів, Україна
E-mail: Kyrylyuk.V@i.ua; ogayovskyi@gmail.com

*Автор для кореспонденції

Стратиграфічне розчленування нижнього докембрію від самого початку було нерозривно пов'язане з вивченням метаморфізму. Деякий час ступінь метаморфізму комплексів навіть використовували як ознаку відносного віку. Ця ознака не знайшла підтвердження ізотопним датуванням, після чого ступінь метаморфізму не брали до уваги при стратиграфічному розчленуванні фундаменту щитів. Ступінь метаморфізму комплексів вже давно не враховується і при складанні офіційних стратиграфічних схем докембрію Українського щита, що призвело, на думку багатьох геологів, до створень реальної стратиграфії фундаменту цього регіону.

Автори статті вважають, що ступінь метаморфізму все ж таки може бути використаний при розробці стратиграфії Українського щита. Можливість такого використання метаморфізму розглянуто у циклі наших публікацій. У першій статті наведено характеристику стратиграфії та метаморфізму всіх мегаблоків Українського щита. Показано, що у кожному з мегаблоків більш давні стратигенні комплекси характеризуються більш високотемпературним метаморфізмом. При цьому відмінні риси складу та ступеня метаморфізму стратигенних комплексів, на думку авторів, є відображенням великих послідовних етапів геологічного розвитку Українського щита в ранньому докембрії та можуть бути основою для складання регіональної стратиграфічної схеми на історико-геологічній основі. Варіант регіональної стратиграфічної схеми Українського щита на історико-геологічній основі, складений на рівні комплексів, запропоновано у другій статті циклу. У цій заключній статті розглянуто вірогідні умови та тривалість літогенезу і супутнього метаморфізму різних послідовно сформованих стратигенних комплексів нижнього докембрію. Висловлено уявлення про те, що вихідний дометаморфічний склад комплексів та їх метаморфізм обумовлені температурним станом верхніх оболонок Землі та їхньою спрямованою тепловою еволюцією на ранніх етапах геологічної історії. Передбачається існування безгідросферного, раннього термогідросферного, пізнього термогідросферного та нормогідросферного глобальних етапів літогенезу, тривалістю від 300 до 700 млн років, та тривалого безперервного метаморфізму від 3,8 до 2,0–1,9 млрд років. За цей час було сформовано єдину метаморфічну (палеотемпературну) зональність фундаменту Українського щита, в якій задіяні усі різновікові стратигенні комплекси.

Ключові слова: метаморфізм регіональний; стратиграфія; геохронологія; нижній докембрій; Український щит.

Цитування: Кирилюк В.П., Гайовський О.В. Регіональний метаморфізм і стратиграфія фундаменту Українського щита. Стаття 3. Особливості літогенезу і метаморфізму ранньодокембрійських комплексів та їхня тривалість. *Геологічний журнал*. 2023. № 2 (383). С. 13–29. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.262163>

Citation: Kyrylyuk V.P., Gaiovskyi O.V. 2023. Regional metamorphism and stratigraphy of the basement of the Ukrainian Shield. Article 3. Features of lithogenesis and metamorphism of the Early Precambrian complexes and their duration. *Geologichnij zhurnal*, 2 (383): 13–29. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.262163>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

Ця стаття продовжує розпочатий у попередніх публікаціях (Кирилюк, Гайовський, 2022, 2023) розгляд деяких аспектів регіонального метаморфізму Українського щита (УЩ), зокрема особливостей метаморфізму головних стратиграфічних комплексів регіону та можливостей використання цих особливостей для стратиграфічного розчленування фундаменту УЩ. Звернення нами до цього аспекту регіональної геології УЩ зумовлено тим, що вже упродовж тривалого часу такі особливості стратигенних комплексів цього регіону, як тип та ступінь регіонального метаморфізму, зовсім не враховують під час розробки регіональних стратиграфічних схем УЩ та визначення в них вікової позиції метаморфічних комплексів, які у схемах УЩ традиційно фігурують як «серії». У випадках розбіжностей щодо вікових співвідношень серій між геологічними даними й уявленнями, які враховують, у тім числі, й особливості метаморфізму, і результатами ізотопних геохронометричних досліджень останнім віддають беззаперечну перевагу. Така ситуація характерна зараз не лише для УЩ, а й для деяких інших щитів давніх платформ. Був час, коли ступінь метаморфізму вважали безумовною ознакою відносного віку нижньодокембрійських метаморфічних комплексів за принципом: «чим вищий ступінь метаморфізму, тим давніший комплекс». Утім наступними ізотопно-геохронометричними дослідженнями ці уявлення, як загальний підхід, спростовано і таке ставлення до них збереглося дотепер. А в умовах, коли між метаморфічними комплексами УЩ, які вважаються різними стратиграфічними підрозділами у ранзі серій чи комплексів, безпосередні контакти зазвичай відсутні, то тут нібито вже просто не залишається іншого шляху визначення їхньої вікової послідовності, крім ізотопного датування.

Між тим вважаємо, що значення типу й ступеня метаморфізму стратигенних комплексів для цілей регіонального стратиграфічного розчленування та кореляції себе не вичерпало і вони мають враховуватися як під час розробки стратиграфічної схеми УЩ, так і для інтерпретації ізотопно-геохронометричних визначень. Такі можливості показано у попередніх публікаціях (Кирилюк, Гайовський, 2022, 2023).

У першій з них розглянуто стратиграфію і метаморфізм мегаблоків УЩ на рівні стратометаморфічних комплексів та зроблено висновок, що для окремих мегаблоків ступінь метаморфізму комплексів є ознакою їхньої відносної стратиграфічної послідовності. Крім того, черговий раз наголошено, що послідовно сформовані стратометаморфічні комплекси відрізняються не лише своїм метаморфізмом, а й геолого-формаційним складом, що дає змогу розглядати їх як структурно-речовинне відображення різних етапів ранньодокембрійського геологічного розвитку та використовувати під час розробки регіональної стратиграфічної схеми УЩ в якості її історико-геологічної основи. У другій статті (Кирилюк, Гайовський, 2023) після відповідних пояснень та посилань запропоновано підготовлений з позицій історико-геологічного підходу варіант стратиграфічної схеми фундаменту УЩ на рівні комплексів. У подальшому в розгорнутій стратиграфічній схемі можна показати реально досягнутий рівень розчленування комплексів на серії та світи, однак при цьому вікову послідовність комплексів вже не можна змінити.

У цій заключній статті викладено уявлення щодо найімовірнішої, зважаючи на сучасні дані, природи ранньодокембрійських комплексів щитів, початкових умов та тривалості їхнього формування і супутнього метаморфізму. Призначення статті щодо власне стратиграфії полягає в історико-геологічному (модельному геоеволюційному) обґрунтуванні саме такої, як показано у таблиці (Кирилюк, Гайовський, 2023), відносної послідовності комплексів. А уявлення про тривалість літогенезу та метаморфізму, на наш погляд, необхідно враховувати під час інтерпретації результатів ізотопно-геохронометричних досліджень, яка досі просто оминає ці аспекти формування стратометаморфічних комплексів.

Особливості літогенезу і метаморфізму ранньодокембрійських комплексів

Раніше, у тому числі в попередній публікації, зазначали, що ступінь метаморфізму ранньодокембрійських комплексів добре корелюється з їхнім геолого-формаційним складом (Кирилюк, 1991, 2007, 2013; Кирилюк, Гайовський, 2023).

Це дало підстави одному з авторів висловити припущення про зв'язок обох цих характеристик стратометаморфічних комплексів з умовами їхнього дометаморфічного літогенезу. Спершу це зроблено лише щодо архейських гранулітових комплексів (Кирилюк, 1971), а пізніше ці уявлення поширено на амфіболіто-гнейсові та інші ранньодокембрійські комплекси щитів (Кирилюк, 1977, 1991, 2007, 2013 та ін.). Суть цих уявлень полягає у тому, що і вихідний дометаморфічний склад комплексів, і їхній метаморфізм пов'язані з передбачуваним специфічним початковим температурним станом верхніх оболонок Землі та їхньою спрямованою температурною еволюцією на ранніх етапах геологічної історії.

Нині вже можна вважати доведеним існування початкової високої (+300–500 °C) температури поверхні Землі в ранньому археї (Шульдинер, 1976; Добрецов, 1980; Hansen, 2007 та ін.) та її послідовне зниження, так само як і пов'язане з цим охолодження приповерхневої частини земної кори. Найвірогідніше, саме загальним охолодженням може бути пояснена зміна в геологічному розвитку щитів монофаціального метаморфізму комплексів нижнього і середнього архею поліфаціальним метаморфізмом пізніших нижньодокембрійських комплексів. Щодо відмінностей геолого-формаційного складу та метаморфізму окремих послідовно сформованих комплексів, як монофаціальних, так і поліфаціальних, то вони могли бути пов'язані вже не з самим охолодженням, а з наслідками охолодження зовнішніх оболонок Землі, а саме – зі зміною умов вулканогенно-осадового літогенезу на її поверхні та з впливом складу сформованих осадів на регіональний метаморфізм. У стислому вигляді загальна модель еволюції ранньодокембрійського літогенезу та метаморфізму уявляється у такому вигляді.

1. Передбачається, що нагромадження вихідних товщ ранньоархейських *грануліто-гнейсових комплексів* відбувалося в «сухих» субаеральних (безгідросферних) умовах, які подібні до тих, що існують нині на поверхні планети Венера (Кирилюк, 1971; Планета..., 1989; Hansen, 2007). Їхнє утворення могло відбуватися шляхом: а) фізичного і хімічного звітрювання, еолового перенесення та нагромадження продуктів звітрювання, б) вулканізму та в) хімічних реакцій у щільній паро-вуглекислій ат-

мосфері, а також між атмосферою і літосферою. За таких вихідних безводних умов нагромадження, високої температури поверхні та приповерхневої частини кори, наступний метаморфізм товщ відбувався в умовах гранулітової фації, минаючи більш низькотемпературні фації, і на глибинах, порівнянних із визначеною потужністю грануліто-гнейсових розрізів (15–17 км). Роль флюїду у процесі метаморфізму відігравав CO₂. Саме така модель може пояснити природу монофаціального гранулітового метаморфізму на всю потужність грануліто-гнейсових комплексів, розпочинаючи майже від поверхні Землі, не пов'язуючи його, як це зазвичай вважає більшість дослідників, з великою глибиною занурення (30–40 км) і наступним значним денудаційним зрізом.

Глобальні субаеральні (безгідросферні) умови дають підстави припускати повсюдне поширення грануліто-гнейсових комплексів на поверхні ранньої Землі. Формування «сухих» вихідних товщ грануліто-гнейсових комплексів та їхній наступний початковий метаморфізм могли відбуватися на тлі зниження температури поверхні аж до температур +150–170 °C. Саме за таких температур, з урахуванням високої щільності паро-вуглекислої атмосфери, могли розпочатися конденсація парів води та формування первинної високотемпературної гідросфери («термогідросфери»). Л.І. Салоп припускав утворення «...первичного горячого океана ... при зниженні температури поверхності Землі нижче +370 °C» (Салоп, 1982, с. 73), тобто за ще вищих температур, що мало ймовірно з різних причин, які заслуговують самостійного розгляду.

2. Поява «термогідросфери» стала початком принципово нового середньоархейського етапу літогенезу та формування вихідних товщ *амфіболіто-гнейсових комплексів*. Зазвичай з появою гідросфери пов'язують виникнення перших водних теригенних осадків, упускаючи разом з тим те, що головним чинником утворення теригенних порід є не сама гідросфера, а гідросфера в поєднанні з кліматичною зональністю і кругообігом води. Саме кругообіг води забезпечує транспортування матеріалу з областей руйнування і знесення на суші до місць його нагромадження у водних басейнах. За передбачуваних температур первинної гідросфери (понад +100 °C), температурної зональності на поверхні

Землі не існувало, «клімат» (якщо його можна так назвати) був азональним, кругообіг води відсутній, і теригенний літогенез мав би зупинитися (був «загальмований») у глобальному масштабі. Це призвело до нагромадження в цей час головно вулканічних утворень, якими і складені амфіболіто-гнейсові («сірогнейсові») комплекси, серед яких доволі екзотично виглядає суттєво літогенна серія Ісуа в Гренландії. Умови формування цієї серії ще потребують додаткового вивчення. Проте вже зараз на підставі дослідження ізотопного складу кисню кременистих порід серії Ісуа визначено, що їхнє утворення відбувалося за температур $+90-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Oskwarek, Perry, 1976), що добре узгоджується з уявленнями про передбачувані «термогідросферні» умови нагромадження амфіболіто-гнейсових комплексів.

Нині відсутні відомості про первинне поширення амфіболіто-гнейсових комплексів на поверхні ранньої Землі. Однак дані про їхню наявність чи можливе існування в геологічному минулому в більшості мегаблоків щитів дають підстави припускати їхній доволі широкий розвиток і на площі щитів, і на поверхні Землі загалом.

Поява комплексів, які сформувалися за умов «термогідросфери», докорінно змінило і перебіг у них процесів метаморфізму порівняно з попередніми грануліто-гнейсовими комплексами. За теплового стану верхньої (приповерхневої) частини земної кори, який близький до того, що забезпечував гранулітовий метаморфізм вихідних «сухих» товщ, температура метаморфізму первинно водонасичених товщ амфіболіто-гнейсових комплексів не могла піднятися вище амфіболітової фації. За надлишку води саме в умовах цієї фації відбувається масове формування гранітної евтектики та термостатування системи на цьому температурному рівні, що перешкоджає подальшому підвищенню температури аж до повного виплавлення гранітної магми. Ці умови формування амфіболіто-гнейсових комплексів і знайшли своє відображення в їхній повсюдній «гранітизації», яка проявляється у широкому розвитку мігматитів і різноманітних плагіо- та двопольовошпатових гранітоїдів.

Прояви регіонального метаморфізму будь-якого типу – і зонального, і монофаціального – зазвичай пов'язують із тектонікою, з тектоніч-

ними рухами, деформаціями та супутнім підвищенням теплового потоку, або з глибиною занурення та збільшенням температури і тиску, які зумовлені існуванням відповідних градієнтів. Відповідно до запропонованої моделі, метаморфізм монофаціальних комплексів, як і будь-які інші геологічні процеси, відбувався на тлі тектонічних рухів, однак не визначався тектонікою. Основними чинниками ранньодокембрійського монофаціального метаморфізму були глобальні високі температури верхніх оболонок Землі та безводний («сухий») для грануліто-гнейсових комплексів або водонасичений для амфіболіто-гнейсових комплексів склад вихідних метаморфізованих товщ. За близької попередньо високої теплової енергонасиченості земної кори різний склад вихідних товщ призводив до принципово різного прояву метаморфізму в нижньоархейських грануліто-гнейсових та в середньоархейських амфіболіто-гнейсових комплексах. Суттєву чи навіть визначальну роль тектоніка відігравала вже у процесах зонального метаморфізму стратигенних комплексів верхнього архею та нижнього протерозою.

3. Наступний пізньоархейський етап літогенезу – це *зеленокам'яні комплекси*, які складені, як і попередні амфіболіто-гнейсові комплекси, головно вулканічними утвореннями, хоч і принципово іншого складу. Їхній переважно вулканічний склад і підпорядкований вміст первинно осадових порід, ймовірно, також, як і для вихідних товщ амфіболіто-гнейсових комплексів, зумовлений формуванням в «термогідросферних» умовах за відсутності кругообігу води. Свідченням цього можуть бути визначення палеотемператури нагромадження кременистих осадків серії Фіг-Три зеленокам'яного поясу Барбертон у Південній Африці, що становлять $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Knauth, Epstein, 1976; Салоп, 1982). Однак склад вулканічних формацій зеленокам'яних комплексів різко відрізняється від вихідних вулканічних утворень амфіболіто-гнейсових комплексів, зокрема наявністю коматітів, що зумовлено, очевидно, тектонічними умовами їхнього формування.

Типові зеленокам'яні комплекси, на відміну від амфіболіто-гнейсових, поширені переважно на дуже обмежених територіях, що одержали назву «граніт-зеленокам'яних областей». Ці області займають до 7–10 % площі фунда-

менту давніх платформ і до 15–20 % території щитів, хоча їм нерідко приписують чи не найпровіднішу роль у структурі докембрійської земної кори, порівнянну з гранулітовими областями. Зеленокам'яні комплекси в межах цих областей залягають на амфіболіт-гранітових комплексах. Граніт-зеленокам'яні області (мегаблоки) є першими у ранній історії земної кори геоструктурними елементами, які чітко індивідуалізовані та обмежені розломами. З їхнім тектонічним розвитком і пов'язані утворення вулканогенних зеленокам'яних комплексів, особливості їхнього складу і метаморфізму. За межами граніт-зеленокам'яних областей трапляються лише поодинокі природозломні зеленокам'яні пояси, які формувалися переважно на гранулітовій основі. На УЩ такі пояси відомі у Приазовському мегаблочі. Осадові утворення, як зазначено вище, у зеленокам'яних комплексах відіграють підпорядковану роль. При цьому повсюдно виражений чіткий зв'язок складу уламкових порід з підстильними вулканітами, продуктами руйнування яких вони і є. Ця особливість свідчить про параавтохтонний характер уламкового матеріалу та його незначне переміщення від місця утворення саме через відсутність кругообігу води. Рушійними силами утворення уламкового матеріалу могли бути звітрявання та хвилеприбійні процеси, які супроводжують землетруси.

Метаморфізм зеленокам'яних комплексів також різко відрізняється від попередніх типів комплексів і відповідає переважно зеленосланцевій та епідот-амфіболітовій фаціям. Більш низькотемпературний за попередні та інший за типом, а саме зональний метаморфізм зеленокам'яних комплексів, який прийшов на зміну монофаціальному метаморфізму, теж пов'язаний, імовірно, із загальним остиганням зовнішніх оболонок Землі та відступом високотемпературних ізотерм на глибину. Разом з тим нижні, приконтаткові з фундаментом, частини розрізів зеленокам'яних комплексів іноді ще потрапляли в умови амфіболітової фації, що близькі до обстановок метаморфізму попередніх амфіболіто-гнейсових комплексів. Саме у таких випадках співвідношення комплексів виглядають як поступовий перехід між ними.

4. Подальше зниження температури приповерхневих оболонок Землі (приблизно до +50–40 °C) призвело до появи на Землі кліматичної

зональності та «запускання» механізму кругообігу води. Це започаткувало принципово новий, ранньопротерозойський етап літогенезу, що характеризувався масовим нагромадженням різноманітних теригенних і хемогенних порід з підпорядкованою роллю вулканічних порід. Цей етап літогенезу, який принципово подібний до фанерозойського, можна назвати «нормогідросферний». На його початку формувалися переважно різноманітні теригенні утворення, як слабо диференційовані (граувакові, поліміктові), так і високозрілі (кварцові) осадові породи, які виникли внаслідок руйнування та перенесення потужних кір звітрявання, що сформувалися впродовж попередніх етапів розвитку. Пізніше до них додалися й хемогенні (карбонатні, кременисті та залістисті) відклади.

Домінування осадових, переважно теригенних вихідних порід є характерною особливістю всіх постзеленокам'яних нижньопротерозойських товщ, що виникли, як зазначено вище, у різних структурно-тектонічних обстановках. Нагадаємо, що на щитах встановлено два типи суттєво теригенних стратометаморфічних комплекси: а) метавулканогенно-хемогенно-теригенний (залістисто-кременисто-сланцевий), поширений у граніт-зеленокам'яних мегаблоках і б) метакарбонатно-теригенний (гнейсо-сланцевий) – у межах граніт-гнейсо-сланцевих мегаблоків. Обидва типи характеризуються зональним метаморфізмом. Перший з них метаморфізований в умовах зеленосланцевої і зрідка епідот-амфіболітової фації, які близькі до метаморфізму зеленокам'яних комплексів. Другий характеризується більш високотемпературним метаморфізмом епідот-амфіболітової, амфіболітової та подекуди навіть гранулітової фації. Різниця в ступені метаморфізму, як і геолого-формаційному складі комплексів, зумовлена їхньою приуроченістю до різних типів мегаблоків та пов'язана з тектонічним розвитком мегаблоків, до яких вони приурочені. Модель, яка пояснює відмінності метаморфізму комплексів та його зв'язок з тектонічними рухами, розглянуто у спеціальній публікації (Кирилюк, 2013).

Викладені вище дані показують виразну кореляцію типу та ступеня метаморфізму нижньодокембрійських комплексів з їхнім складом, а модельна геоеволюційна інтерпретація цих

ознак дає підґрунтя для стратиграфічної кореляції комплексів. Однак подібну чисто речовинну геолого-формаційну кореляцію в сучасних умовах багато дослідників вважає непереконливою та не сприймає без використання ізотопних геохронометричних даних. Крім того, стратиграфічне зіставлення на підставі подібності складу і ступеня метаморфізму комплексів досить часто суперечить ізотопним віковим датуванням, які є близькими для різних стратометаморфічних комплексів та нерідко дуже відрізняються в однотипних комплексах. Тому, для порівняння й оцінки можливостей використання речовинно-метаморфічних та ізотопно-геохронометричних даних у стратиграфії нижнього докембрію, доцільно стисло розглянути уявлення про тривалість літогенезу та метаморфізму ранньодокембрійських стратометаморфічних комплексів.

Тривалість стратолітогенезу та метаморфізму ранньодокембрійських комплексів

Одним з найважливіших досягнень ізотопних геохронометричних досліджень вже в перші десятиліття їхнього систематичного використання стало виявлення величезної, порівняно із передбачуваною раніше, тривалості як усього докембрію, так і раннього докембрію (архею і раннього протерозою), що становить, за сучасними уявленнями, близько 2 млрд років – від понад 4,03 до 2,0–1,9 млрд років. Цей часовий діапазон, відповідно до наведених вище геоісторичних уявлень, охоплює чотири етапи, що відповідають еонам у прийнятій нами геохронологічній систематиці і термінології. Еони, як показано вище, розрізняються умовами вулканогенно-осадового літогенезу, у ході яких і сформувалися вихідні товщі всіх типів стратометаморфічних комплексів щитів. Тривалість кожного з еонів становила не менше 300 млн років і, вірогідно, могла сягати 700–800 млн років. Імовірно, що за такої тривалості у вікових межах кожного з етапів-еонів територіально роз'єднані комплекси одного типу могли формуватися як синхронно, так і з суттєвим зміщенням (сковзанням, плином) у часі. Разом з тим, незважаючи на їхню можливу різновіковість, вони зберігали основні характерні риси складу та подібність територіально

роз'єднаних комплексів, оскільки близькі умови їхнього формування зберігалися впродовж усього еону.

Ці уявлення про принципову можливість асинхронного формування подібних комплексів підтверджує датування зеленокам'яних комплексів різних регіонів за синпетрогенними (дометаморфічними) цирконами вихідних вулканічних порід, що показує реальне, а не передбачуване, вірогідне існування різних вікових груп однотипних комплексів. У різних публікаціях зазвичай наводять три вікові групи зеленокам'яних комплексів, для яких автори вказують різні часові рубежі, утім таких груп у глобальному масштабі можна виділити й більше. Наприклад, відомий дослідник зеленокам'яних поясів (ЗКП) А.Б. Вревський вказує на «...существование, по крайней мере (курсив наш. – В.К., О.Г.), трех возрастных групп (периодов) формирования ЗКП (3,55–3,1, 3,0–2,85 и 2,8–2,65 млрд лет)» (Вревский, 2011, с. 34). У загальній стратиграфічній шкалі нижнього докембрію Росії так само розрізняють три генерації зеленокам'яних поясів, утім з дещо іншими часовими діапазонами: 3200–3000, 3000–2800, 2800–2550 млн років (Общая..., 2002).

Різні вікові рамки комплексів зеленокам'яних поясів для різних щитів наведено у фундаментальних працях з докембрію останніх десятиліть (Earth's..., 2007; Gradstein et al., 2012). Однак разом з тим усі зеленокам'яні комплекси, на загальну думку, характеризують один глобальний етап розвитку земної кори, який Л.І. Салоп виділив під назвою «стадии зеленокаменных поясов» (Салоп, 1982, с. 332) з віковим інтервалом 3500–2600 млн років. Цей самий інтервал 3500–2500 млн років Л.П. Зоненшайн зі співавторами (Зоненшайн и др., 1976) ще в середині 1970-х рр. розглядав як час прояву асинхронної «сковзної» границі, що розділяє два принципово різних етапи в ранньодокембрійській історії Землі. На першому етапі «...не обнаруживается аналогов фанерозойских геодинамических обстановок и, очевидно, механизм тектоники плит не действовал» (Зоненшайн и др., 1976, с. 204). Другий етап (до 1700 млн років) проміжний: «...в нем, с одной стороны, продолжается «нелинейная тектоника»..., а с другой – ...возникают древнейшие бассейны океанического типа, хотя и отличающиеся от более поздних, но к развитию которых уже приложим механизм тектоники плит»

(Зоненшайн и др., 1976, с. 204). Вірогідно, що у вигляді такої «сковзної» границі прийнято асинхронний початок формування в різних регіонах пізньоархейських зеленокам'яних комплексів. Але за загальної тривалості «зеленокам'яного етапу» близько 0,9–1,0 млрд років, як показує датування верхніх і нижніх частин розрізів, кожен конкретний зеленокам'яний комплекс формувався впродовж порівняно короткого проміжку часу в 120–150 млн років.

Спроби визначення тривалості та вікових рубежів формування здійснювали і для слабо метаморфізованих залізисто-кременисто-сланцевих комплексів, зокрема для криворізької серії на підставі датування передбачуваної сингенетичної уран- і свинецьвмісної мінералізації (Тугаринов, Войткевич, 1966; Семененко и др., 1974; Бартницкий и др., 1985). Однак ці визначення не дали надійних результатів і, як сказано в одній з нещодавніх узагальнюючих публікацій, за сучасними даними «...геохронологические рубежи формирования криворожской серии *весьма приближены* (курсив наш. – В.К., О.Г.) из-за отсутствия в ее разрезе цирконсодержащих вулканических пород, используемых для прецизионного датирования» (Геохронология..., 2008, с. 202).

У результаті ці рубежі і тривалість формування криворізького комплексу в об'ємі криворізької серії, а також глеуватської і гданцівської світи визначено на підставі датувань кластогенних цирконів з різних частин розрізу комплексу. За цими даними, «...нижняя возрастная граница метаосадков криворожской серии – 2800 млн лет (2,8 млрд лет – возраст кластогенного монацита в метапесчаниках скелеватской свиты)» (Геохронология..., 2008, с. 202). Обґрунтування віку верхньої частини розрізу криворізького комплексу зробили Г.В. Артеменко та його співавтори також за результатами вивчення кластогенних цирконів з порід глеуватської світи (Артеменко и др., 2018). «Наймолодша» група цирконів світи має вік 2,09–2,14 млрд років, на підставі чого зроблено висновок, що «...нижняя возрастная граница метатерригенных пород глеуватской свиты составляет около 2,1 млрд лет. Верхняя возрастная граница осадконакопления метатерригенных пород глеуватской свиты определяется по датировке прорывающих ее альбититов 1890 ± 75 млн лет» (Артеменко и др., 2018, с. 55).

Таке датування границь і тривалості формування вихідних товщ інших типів стратометаморфічних комплексів за первинними сингенетичними мінералами неможливе у зв'язку з їхнім повсюдним інтенсивним високотемпературним метаморфізмом, що призвів до спотворення вихідних ізотопних відношень та утворення метаморфогенних цирконів з новими ізотопними системами. Для визначення границь деяких підрозділів таких комплексів, наприклад для кошаро-олександрівської світи побузького комплексу, а разом з нею і для всієї бузької серії, також іноді використовують нібито кластогенні циркони (Лесная и др., 1995; Степанюк и др., 2010), хоч така їхня природа завжди досить проблематична (Лесная и др., 1995; Шумлянский, 2012). Верхні границі комплексів визначають на підставі датувань ультраметаморфічних або інтрузивних утворень, що їх, відповідно, заміщують або проривають. Однак усі ці непрямі дані не дають підстав ані для визначення істинного «стратиграфічного» віку комплексів, ані для тривалості їхнього формування.

Зазвичай для датування високометаморфізованих комплексів як у регіональних стратиграфічних схемах, так і в GTS використовують «найдавніші» значення ізотопного віку, які отримано або за окремими мінералами з порід цих комплексів, або, як у випадку із серією Ісуа, за породою загалом (Майерс, 1982). Однак навіть «найдавніші» датування з високометаморфізованих комплексів, найімовірніше, відповідають часу їхнього метаморфізму, або «омолоджені» в ході метаморфізму та не відображають «стратиграфічний» вік комплексів. Таких уявлень дотримуються багато дослідників, зокрема і Дж.С. Майерс, який пише: «Железистые кварциты (серии Исуа – додано нами. – В.К., О.Г.) имеют Pb-Pb-изохронный возраст 3760 ± 70 млн лет, а некоторые гнейсы могут быть древнее, чем суперкрупные породы Исуа, хотя они дают Rb-Sr-изохронный возраст по породе в целом 3170 ± 140 млн лет» (Майерс, 1982, с. 177). За такого підходу за методом «найдавніших» датувань для визначення віку деяких комплексів і серій нерідко використовують, вірогідно, дуже змінені («омолоджені») ізотопні датування порівняно з віком вихідних товщ, і прийнятий на їхній основі «стратиграфічний» вік комплексів виявляється дуже спотвореним,

як у випадку з росинсько-тікицькою, західно-приазовською та бузькою серіями КХС УЩ. Разом з тим потрібно підкреслити, що поряд з «найдавнішими» датуваннями у тих самих високометаморфізованих комплексах зазвичай є і значно молодші визначення, про що буде сказано нижче.

Питання можливої тривалості метаморфізму та його впливу на одержувані датування під час стратиграфічного розчленування та побудови стратиграфічних схем зазвичай не розглядають. За умовчанням вважають, що метаморфізм стратометаморфічних комплексів є досить короткочасним процесом порівняно з тривалістю їхнього літогенезу, а також може проявлятися неодноразово у зв'язку з гіпотетичними «тектонічними подіями» («епізодами», «імпульсами метаморфізму»), про що нібито свідчать дискретні значення віку мінералів, отримуваних з одного і того самого метаморфічного комплексу. Однак спільна інтерпретація даних про регіональний розподіл на УЩ метаморфічних фацій і наявні нині датування дають підстави по-іншому поглянути на час і тривалість метаморфізму в геологічній історії УЩ.

З цього приводу нагадаємо, що у середині 1970-х – на початку 1980-х рр. Р.Я. Белевцев висловив припущення про наявність на УЩ єдиної регіональної метаморфічної зональності (Белевцев, 1975, 1982). Наявність такої зональності підтверджено під час складання «Карты фацій регіонального метаморфізма Українського щита» масштабу 1:500 000 (Карта..., 1982), у пояснювальній записці до якої сказано: «Большинство районов (Українського щита – додано нами. – В.К., О.Г.) связано между собой переходными зонами. Это особенно характерно для районов западной части щита – Северо-Западного, Днестровско-Бугского и Росинско-Тикичского. Существует, по-видимому, и переходная зона от Днестровско-Бугского района к Ингуло-Ингулецкому. В нее, вероятно, следует включить Братский синклиорий и южную часть Побужья. Западно-Ингулецкую зону можно рассматривать как переходную между Ингуло-Ингулецким и Среднеприднепровским районами» (Карта..., 1982, с. 68).

Приклади поступових переходів між породними асоціаціями різних фацій метаморфізму, що підтверджують таку регіональну метамор-

фічну зональність у кожному з геологічних районів УЩ, наведено у відомій ґрунтовній колективній монографії (Метаморфізм..., 1982), яка не втратила значення донині. Водночас потрібно особливо підкреслити, що ці переходи зазвичай описані безвідносно віку стратиграфічних підрозділів, що беруть у них участь, і супутніх ізофаціальних ультраметаморфічних утворень, а майже винятково на підставі розподілу і взаємопереходів породних асоціацій різних метаморфічних фацій. Як зазначають самі автори у вступі до монографії (Метаморфізм..., 1982), «...настоящая книга написана как объяснительная записка к карте фацій регионального метаморфізма Украинского щита ... и является результатом мелкомасштабного метаморфического картирования, которое ... ведется на Украинском щите коллективом Института геохимии и физики минералов АН УССР начиная с 1968 г.» (Метаморфізм..., 1982, с. 5). На цю особливість підходу авторів монографії до опису метаморфізму УЩ порівняно нещодавно спеціально звернув увагу К.О. Савко (Савко, 2013). На його думку, «...авторы карты фацій регионального метаморфізма Украинского щита, по сути, выполнили и отразили на карте результаты метаморфического картирования как самостоятельного вида геолого-съёмочных работ» (Савко, 2013, с. 7).

Якщо розглянути цю зональність на тлі різновікових стратометаморфічних комплексів, то можна побачити, що вона охоплює як зони прогресивного метаморфізму, так і площі проявів діафорезу, що виступають як перехідні зони між різновіковими комплексами. Такий перехід від гранулітової фації побузького комплексу і супутніх ізофаціальних «бердичівських гранітів» через зону діафорезу до «житомирських гранітів» та тетерівського комплексу детально описано у північній частині Подільського блока та прилеглий частині Волинського блока (Метаморфізм..., 1982, с. 71–72, 85–91). Перехідною зоною між побузьким гранулітовим та росинсько-тікицьким амфіболіто-гнейсовим комплексами є добре відома територія розвитку діафоритів та супутніх гранітоїдів у басейні р. Соб.

Інший тип переходу наявний у межах південно-західної частини Інгульського мегаблока у міру наближення до площі поширення гранулітового комплексу Середнього Побужья.

Цей комплекс переходить у сусідній Інгульський мегаблок, у межах якого для нього запропоновано власну назву «братський комплекс» (Кирилюк, Смоголюк, 1993). В цьому напрямку зональний метаморфізм інгуло-інгулецького комплексу підвищується до рівня гранулітової фації, у межах якої й втрачено («зникає») контакт між інгуло-інгулецьким та братським комплексами. А характеризуючи зональність усього Інгуло-Інгулецького району або Інгульського мегаблока у прийнятій сучасній схемі районування (Кореляційна..., 2004), автори пишуть: «Породы одной фации или субфации метаморфизма слагают большие площади, как в нижнепротерозойской толще, так и на выступах архейского гранитоидного фундамента. Эти зоны по латерали закономерно переходят друг в друга и образуют единую региональную метаморфическую зональность раннепротерозойского возраста» (Метаморфизм..., 1982, с. 167).

За даними авторів, і «...на території Среднего Приднепровья прослежена закономерная региональная метаморфическая зональность, которая, подчиняясь общему плану геологического строения, в деталях накладывается на складчатые структуры. Эта метаморфическая зональность закономерно переходит в метаморфическую зональность Криворожско-Кременчугской и Орехово-Павлоградской зон. По отношению к осадочно-вулканогенным метаморфическим толщам верхнего структурного этажа ... метаморфизм является прогрессивным и региональным, а по отношению к гранитоидам архейского фундамента (и аульской серии) – наложенным, повторным» (Метаморфизм..., 1982, с. 196). Дещо раніше у цій праці сказано, що «...в районе выделяются три разновозрастных структурно-метаморфических комплекса: нижний, представленный породами переработанного фундамента, средний, включающий образования конкско-верховцевской серии и соответствующие ей по возрасту гранитоиды, и верхний, представленный криворожской серией. В связи с тем, что по некоторым особенностям геологического положения и характеру метаморфизма два последних комплекса обнаруживают определенное сходство, в дальнейшем они будут рассматриваться совместно в составе единого верхнего яруса» (Метаморфизм..., 1982, с. 171).

Подібна регіональна метаморфічна зональність, яку, мабуть, краще називати «регіональною палеотемпературною зональністю», що охоплює весь фундамент УЩ, у тім числі не лише метаморфічні утворення, а й ультраметаморфічні комплекси, не могла сформуватися внаслідок дискретних етапів метаморфізму. Участь у ній монофаціальних комплексів, які зазнали діафорезу лише частково у приконтактових частинах з молодшими комплексами, а іноді й без повторних змін і просто пов'язаних з ними поступовими переходами, дає підстави припустити, що формування цієї зональності відбувалося тривало, впродовж усього раннього докембрію, з послідовним залученням до загального високотемпературного теплового поля всіх новоутворених стратигенних комплексів.

Підтвердженням дуже тривалого метаморфізму, точніше РТ-умов, у яких тривалий час існували різновікові стратометаморфічні комплекси та відбувалися мінеральні перетворення, можуть бути масові ізотопні датування, які отримано впродовж останнього десятиліття з порід побузького гранулітового комплексу. Для найвищої (за нашими даними) у розрізі побузького комплексу сальківської світи, з гіперстенових плагіогнейсів кар'єру Одеса, неподалік с.м.т. Завалля, які у публікації (Бибикова, 2004) названо «ендербітами», О.В. Бібіковою ще близько 20 років тому «... для максимально конкордантних цирконов по ізотопному отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ получен возраст, равный 3,65–3,60 млрд лет. Для одного незонального ядра внутри зонального кристалла определен почти конкордантный возраст – 3,78 млрд лет» (Бибикова, 2004, с. 16).

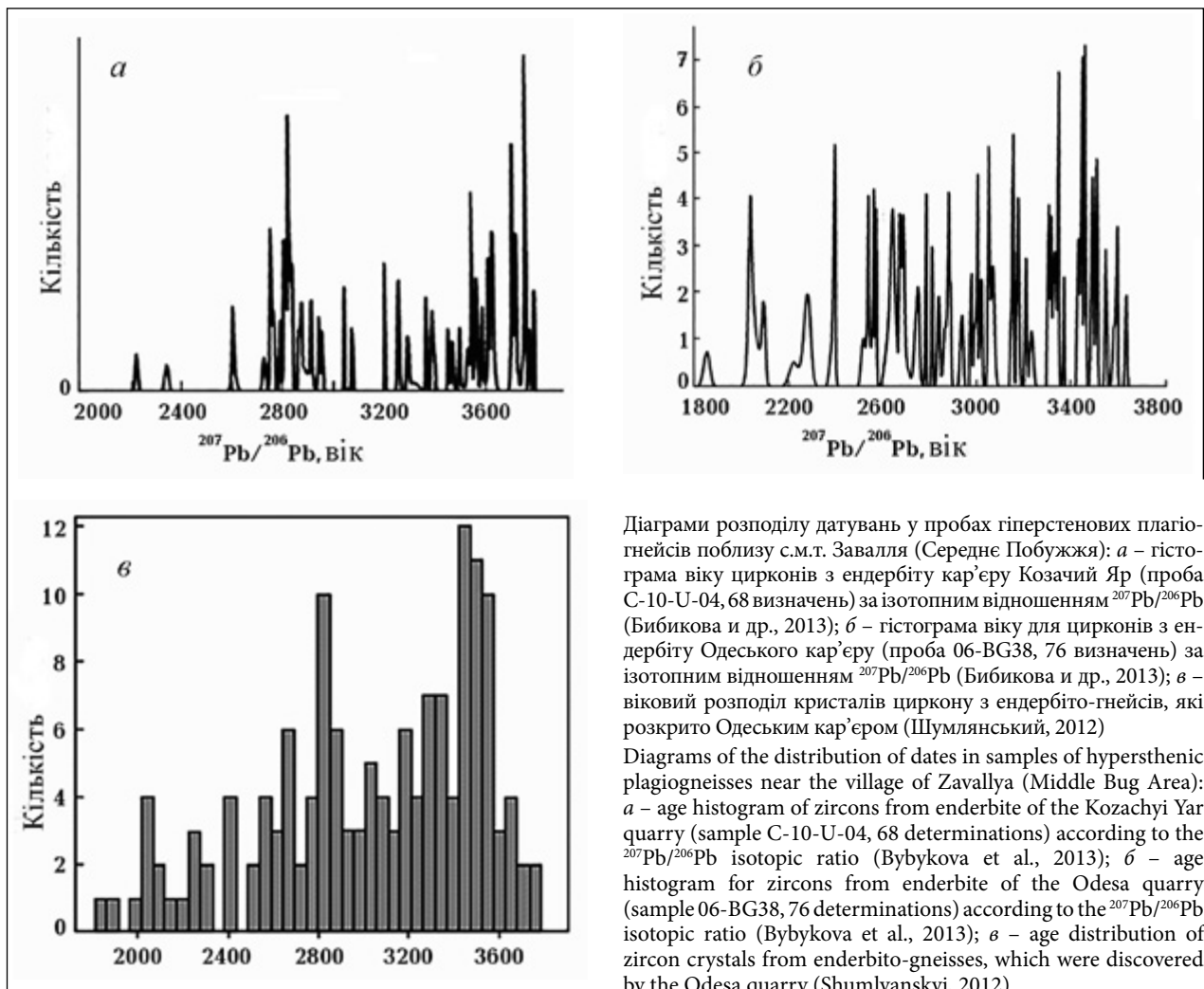
У результаті ізотопно-геохронометричних досліджень останнього десятиліття з порід сальківської світи, крім наведених вище датувань, отримано й додаткові давні визначення «...возрастом до 3800 Ма (3789 ± 4 и 3775 ± 5 млн лет) с почти ненарушенной уран-свинцовой изотопной системой» (Бибикова и др., 2013, с. 117), і численні, що виміряні вже сотнями, якщо не тисячами, молодші датування. Це дало змогу різним дослідникам зробити однакові висновки про те, що отримані визначення віку «...по ізотопному отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ занимают весь диапазон между 3500–1900 Ма» (Бибикова и др., 2013, с. 109),

«...ендербіто-гнейси діоритового складу містять полігенний комплекс кристалів циркону, що формувалися впродовж тривалого часу – від 3790 до 1855 млн років тому» (Шумлянський, 2012, с. 77), «...полученные значения достоверных (конкордантных) дат лежат в возрастном интервале 3,65–1,99 млрд. лет» (Лобач-Жученко и др., 2011, с. 3). У цьому віковому діапазоні С.Б. Лобач-Жученко та її співавтори виділяють практично безперервний ряд тривалих геологічних подій, серед яких і завершальна «...палеопротерозойская структурно-метаморфическая переработка: деформации, приведшие к формированию shear zone, гранулитовый метаморфизм (~2 млрд лет)» (Лобач-Жученко и др., 2013, с. 96).

Діаграми розподілу датувань цирконів, що підтверджують висновки авторів, наведено на рисунку. Необхідно підкреслити, що всі датування, які показано на кожній з діаграм, отримано з однієї проби, тобто аналізовані різновікові циркони є співіснуючими у межах обмеженого простору. Разом з тим, як зазначають автори, для проби С-10-U-04 з кар'єру Козачий Яр «...степень конкордантности большинства изотопных возрастов высокая» (Бибикина и др., 2013, с. 104), для проби 06-BG38 з Одеського кар'єру «...большинство изотопных возрастов дискордантны» (Бибикина и др., 2013, с. 109).

Л.В. Шумлянський, який виділив декілька вікових груп цирконів, указує на високу конкордантність значень ізотопного віку цирконів різних груп: «...циркони з конкордантними значеннями ізотопного віку спостерігаються або в інтервалі >3400 млн рр. (всі значення або конкордантні, або близькі до них), в інтервалі 2600–2800 млн рр. (переважна більшість значень або конкордантні, або близькі до них) та в інтервалі 1850–2100 млн рр. (всі значення конкордантні)» (Шумлянський, 2012, с. 69).

Л.В. Шумлянський, який виділив декілька вікових груп цирконів, указує на високу конкордантність значень ізотопного віку цирконів різних груп: «...циркони з конкордантними значеннями ізотопного віку спостерігаються або в інтервалі >3400 млн рр. (всі значення або конкордантні, або близькі до них), в інтервалі 2600–2800 млн рр. (переважна більшість значень або конкордантні, або близькі до них) та в інтервалі 1850–2100 млн рр. (всі значення конкордантні)» (Шумлянський, 2012, с. 69).



Діаграми розподілу датувань у пробах гіперстеневих плагіогнейсів поблизу с.м.т. Завалля (Середнє Побужжя): а – гістограма віку цирконів з ендербіту кар'єру Козачий Яр (проба С-10-U-04, 68 визначень) за ізотопним відношенням $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Бибикина и др., 2013); б – гістограма віку для цирконів з ендербіту Одеського кар'єру (проба 06-BG38, 76 визначень) за ізотопним відношенням $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Бибикина и др., 2013); в – віковий розподіл кристалів циркону з ендербіто-гнейсів, які розкрито Одеським кар'єром (Шумлянський, 2012)

Diagrams of the distribution of dates in samples of hypersthenic plagiogneisses near the village of Zavallya (Middle Bug Area): a – age histogram of zircons from enderbite of the Kozachiy Yar quarry (sample C-10-U-04, 68 determinations) according to the $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ isotopic ratio (Bybykova et al., 2013); б – age histogram for zircons from enderbite of the Odessa quarry (sample 06-BG38, 76 determinations) according to the $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ isotopic ratio (Bybykova et al., 2013); в – age distribution of zircon crystals from enderbite-gneisses, which were discovered by the Odessa quarry (Shumlyanskiy, 2012)

Як і С.Б. Лобач-Жученко із колегами, О.В. Бібікова та її співавтори зазначають, що оболонки зональних кристалів «...имеют исключительно низкие содержания урана, особенно облоочки, сформированные около 2.0 млрд. лет назад, что указывает, скорее всего, на гранулитовые условия метаморфизма в это время» (Бибикова и др., 2013, с. 109).

Наведені дані дають змогу зробити два висновки, надзвичайно важливих, на наш погляд, для інтерпретації ізотопних датувань насамперед стосовно стратиграфічних побудов. Перший з них полягає в тому, що побузький комплекс упродовж тривалого часу, близько 2 млрд років (від понад 3800 до 1900 млн років.), перебував у високотемпературних умовах, за яких у цьому часовому діапазоні можливе як формування нових мінералів з їхніми ізотопними системами, так і спотворення ізотопних відношень у раніше утворених мінералах. Другий висновок, що заслуговує на окреме формулювання, полягає в тому, що ці умови, впродовж усього датованого часу, відповідали гранулітовій фації метаморфізму. Разом з тим немає жодних даних, які свідчать про можливе суттєве зниження в цей період температурних умов, що виходять за межі однієї фації, та їхню подальшу регенерацію (тобто прояв дискретних етапів метаморфізму), однак є підстави припускати помітну зміну в ході геологічного розвитку режиму тиску під час метаморфізму. Щодо температурних умов, то вони, найвірогідніше, перебували у стані надзвичайно повільного остигання, яке деякі дослідники називають «охладжение с нулевой скоростью (изотермический процесс)» (Левский, 2006, с. 422).

Якщо прийняти часовий інтервал від понад 3800 до приблизно 1900 млн років, який визначено за ізотопними датуваннями, що отримано з однієї проби, яка належить до верхів розрізу побузького комплексу, та вважати його часом ендеогенного становлення комплексу, то необхідно визнати таке. По-перше, всі вони не стосуються «стратиграфічного» віку побузького комплексу як інтервалу часу, впродовж якого відбулося нагромадження його первинних, дометаморфічних товщ. З використанням геохронометричних датувань його «стратиграфічний» вік можна визначити лише як такий, що перевищує 3,8 млрд років. По-друге, всі відомі датування побузького гранулітового

комплексу на всій площі його поширення, як отримані з метаморфічних порід, так і з супутніх ізофаціальних ультраметаморфічних утворень (а цих датувань загалом, ймовірно, вже багато сотень, якщо не тисячі!), укладаються в цей часовий інтервал і не суперечать уявленням про його тривале формування (або перебування) в умовах гранулітової фації.

У цьому самому часовому діапазоні знаходяться наявні датування приазовського комплексу, однак у зв'язку з їхньою меншою кількістю вони поки становлять не безперервний, а дискретний часовий ряд. «Найдавніші» з них мають 3,95 млрд років і отримані для ксеногенних, як уважають Г.В. Артеменко та його співавтори, цирконів з трахіандезитів нижньопротерозойської гуляйпільської світи. Ці датування автори пов'язують з утворенням тоналітової кори Приазовського блока, вказуючи на «...существование наряду с ними значений 3,67, 3,5 и 3,3 млрд. лет, также якобы отвечающих времени образования тоналитовой коры в палеоархее» (Артеменко и др., 2020, с. 20), утім отриманих із власне приазовського гранулітового комплексу. С.Б. Лобач-Жученко та її колеги у геологічній історії Приазовського блока також розрізняють етап формування «...палеоархейской коры, которая сложена тоналитами (3,5–3,6 млрд. лет), ... этап мезоархейского высокотемпературного метаморфизма (2,86 млрд. лет) и последний этап метаморфизма (~2 млрд. лет)» (Лобач-Жученко и др., 2010, с. 217). Утім, на відміну від побузького комплексу, в якому всі датування цього діапазону отримано з порід, що сформовані в умовах гранулітової фації, у приазовському комплексі, який попередньо також метаморфізований в умовах гранулітової фації, в цей часовий інтервал потрапляють і значно поширені у комплексі діафторити амфіболітової фації.

Усі відомі датування з монофаціальних амфіболіто-гнейсових комплексів (аульський і рошинсько-тікицький) і супутніх ізофаціальних ультраметаморфічних гранітоїдів, а також із зональних тетерівського й інгуло-інгулецького комплексів, відрізняючись своїми «найдавнішими» значеннями, які є меншими, ніж у грануліто-гнейсових комплексах, також становлять низхідні дискретні ряди аж до 2000–1900 млн років. Водночас у часові ряди ізотопних визначень потрапляють не лише U-Pb-датування

за цирконами, а й отримані К-Аг та іншими методами за породоутворюючими мінералами і породами в цілому (Каталог..., 1978; Геохронологія..., 2008). Ці дані про наявність датувань близько 2000–1900 млн років у різновікових і різнофаціальних стратометаморфічних комплексах також можуть бути непрямим підтвердженням існування метаморфічної (палеотемпературної) зональності УЩ аж до раннього протерозою і свідчать, найвірогідніше, про загальну тектоно-термальну консолідацію в цей час фундаменту щита та кінцеву стабілізацію ізотопних систем метаморфічних порід і мінералів в усіх різновікових стратиграфічних комплексах УЩ. Існування цього подійного вікового рівня в історії УЩ, який підтверджено ізотопними датуваннями, визнають і фахівці в галузі геохронометричних досліджень. Однак вони пояснюють ці датування не часом завершення активного розвитку УЩ, а ранньопротерозойською активізацією та інтенсивною переробкою всіх давніших комплексів, для чого, крім самих датувань, немає жодних геологічних підстав.

Отже, наведені вище дані про наявність регіональної метаморфічної (палеотемпературної) зональності у фундаменті УЩ, в якій задіяні усі різновікові стратиграфічні комплекси, та значну тривалість її формування – від понад 3800 до 2000–1900 млн років, пояснюють як наявність різних ізотопних датувань цього часового діапазону в однотипних територіально роз'єднаних стратометаморфічних комплексах, так і однакові датування у різновікових стратиграфічних комплексах. За цих умов, а також з урахуванням надзвичайної тривалості як процесів нагромадження вихідних дометаморфічних товщ, так і подальшого метаморфізму та ультраметаморфізму, ізотопне датування порід і мінералів з їхніми фіксованими значеннями не може бути підставою ні для стратиграфічного розчленування метаморфічних утворень, ні для вікової кореляції їхніх стратиграфічних підрозділів.

Висновок

Усі розглянуті у попередніх (Кирилюк, Гайовський, 2022, 2023) та цій публікації аспекти геології та ранньодокембрійського геологічного розвитку УЩ, що стосуються співвідношення

метаморфізму і стратиграфії, у стислому викладі зведено до такого:

1. У будові фундаменту УЩ задіяні п'ять головних типів стратометаморфічних комплексів: а) грануліто-гнейсовий; б) амфіболіто-гнейсовий; в) зеленокам'яний (метавулканогенний); г) залізисто-кременисто-сланцевий (метавулканогенно-хемогенно-теригенний); д) гнейсо-сланцевий (метакарбонатно-теригенний). Перші два належать до монофаціального (ареального) типу комплексів, а інші – до поліфаціального (зонального) типу. Термін «стратометаморфічний комплекс», що використано для їхнього позначення, покликаний підкреслити важливу, а для монофаціальних комплексів визначальну роль процесів стратолітогенезу у формуванні їхнього сучасного вигляду, у тім числі ступеня метаморфізму, а не тільки ендегенних чинників, як це зазвичай прийнято вважати. Всі підрозділи КХС УЩ, що показані в ній у ранзі серій (крім клесівської та овруцької), належать до одного з перерахованих типів стратометаморфічних комплексів та заслуговують на виділення в регіональній стратиграфічній схемі у вигляді «стратиграфічних комплексів».

2. Як показують структурно-стратиграфічні співвідношення стратометаморфічних комплексів УЩ, принцип «чим вищий ступінь метаморфізму комплексу, тим він давніший» повністю зберігає своє значення в межах усіх окремо взятих мегаблоків (Кирилюк, Гайовський, 2022, табл. 2), однак його не можна використовувати для регіону в цілому. У деяких мегаблоках, наприклад у Волинському й Інгульському, нижньопротерозойські комплекси метаморфізовані інтенсивніше за верхньоархейські комплекси Придніпровського і Приазовського мегаблоків. Водночас, відповідно до цього принципу, розташування в КХС УЩ у межах Приазовського мегаблока косивцівської зеленокам'яної товщі (комплексу) між двома гранулітовими серіями, яке зроблене виключно на підставі ізотопного датування, не може мати ніякого геологічного обґрунтування.

3. Характер метаморфізму стратометаморфічних комплексів добре корелюється з особливостями їхнього складу, що, вірогідно, свідчить про генетичний зв'язок цих ознак, який закладено ще на стадії стратолітогенезу комплексів.

Для монофаціальних стратометаморфічних комплексів цей зв'язок зумовлений палеогеографічними («палеокліматичними») обстановками їхнього формування: а) безгідросферні («сухі») субаеральні умови під час нагромадження вихідних товщ грануліто-гнейсових комплексів і б) високотемпературні гідросферні («термогідросферні») умови нагромадження протолітів амфіболіто-гнейсових комплексів. Для поліфаціальних комплексів причиною кореляції в них особливостей складу та метаморфізму могли бути тектонічні умови формування комплексів. Нагадаємо, що різні типи зональних комплексів виявляють чітку приуроченість до різних типів мегаблоків, які відрізняються своєю геотектонічною історією і еволюцією.

4. Особливості складу стратометаморфічних комплексів, їхньої передбачуваної зумовленості умовами нагромадження вихідних товщ, а також закономірності поширення комплексів у структурі фундаменту УЩ, дають можливість виділити чотири послідовних етапи формування вихідних товщ стратометаморфічних комплексів з властивим кожному з них типом літогенезу: а) ранній архей – безгідросферний субаеральний (протогрануліто-гнейсовий); б) середній архей – ранній термогідросферний (протоамфіболіто-гнейсовий); в) пізній архей – пізній термогідросферний (протозеленокам'яний); г) ранній протерозой – нормогідросферний (протозалізисто-кременисто-сланцевий і протогнейсово-сланцевий). Зміна типів літогенезу зумовлена загальним остиганням верхніх оболонок Землі та мала спрямований, незворотний характер. Зважаючи на загальну тривалість раннього докембрію (від понад 4000 до приблизно 1900 млн років) та його чотиричленний поділ, який прийнято у шкалі GTS, тривалість кожного з етапів, упродовж якого зберігалися близькі умови нагромадження вихідних товщ, становила від 300 до 700 млн років.

5. У фундаменті УЩ чітко проявлена метаморфічна (палеотемпературна) зональність, в якій задіяні усі різновікові ранньодокембрійські стратиграфічні комплекси та супутні ультраметаморфічні утворення. Разом з тим у кожному з комплексів збереглися свої індивідуальні особливості метаморфізму, що свідчить про послідовне формування («нарощування») цієї зональності в міру утворення нових стратиграфічних комплексів. Формування та існування зональності відбувалося розпочинаючи від

раннього архею (понад 3800 млн років) і до раннього протерозою (приблизно 2000–1900 млн років). За такого тривалого існування різновікових комплексів в умовах регіонального метаморфізму у них синхронно продовжувалися процеси оновлення ранніх та виникнення нових ізотопних систем у породах і мінералах. Цим, вірогідно, і можна пояснити наявність у кожному з комплексів різних ізотопних датувань, часто в широкому віковому діапазоні. Найвиразніше різноманіття датувань, у вигляді майже безперервного ряду від 3800 до 1900 млн років, виявлено останніми десятиліттями за результатами масового ізотопного датування в побузькому гранулітовому комплексі, а поки що дискретні ряди датувань відомі в усіх комплексах. Тривале існування різновікових комплексів в умовах єдиної метаморфічної зональності добре пояснює наявність близьких датувань у різновікових комплексах, що належать до різних стратометаморфічних типів, і різних датувань в однотипних комплексах, найвірогідніше, близьких за віком.

6. За такого тривалого існування різновікових стратиграфічних комплексів в умовах регіонального метаморфізму, здебільшого середньо- і високотемпературного, навряд чи можна очікувати збереження у них первинних (синпетрогенних) ізотопних систем, хіба що у слабо метаморфізованих метавулканогенних зеленокам'яних комплексах. Тому, вірогідно, ізотопні датування порід і мінералів ранньодокембрійських середньо- і високотемпературних стратометаморфічних утворень не можна ефективно застосовувати для стратиграфічних цілей самостійно, а тільки спільно з вивченням умов їхнього літогенезу та метаморфізму.

7. Водночас, якщо прийняти як можливу концепцію спрямованої, незворотної еволюції літогенезу та пов'язаного з нею регіонального метаморфізму в ранньодокембрійському геологічному розвитку, то стратиграфічне розчленування нижнього докембрію і кореляцію його підрозділів на рівні комплексів можна здійснювати з використанням особливостей їхнього метаморфізму і геолого-формаційного складу у вікових межах еонотем – нижнього, середнього, верхнього архею та нижнього протерозою, тобто у часових інтервалах у кілька сотень мільйонів років. Точніше визначення віку комплексів теоретично можливе лише

з використанням ізотопного датування. Однак поки що кореляцію основних стратиграфічних підрозділів – серій – на підставі даних ізотопного датування, як це і показано в КХС УЩ, здійснюють з такою самою точністю, і також у межах чотирьох загальних вікових підрозділів нижнього докембрію, з тією лише різницею, що

в одні й ті самі загальні геохронологічні підрозділи потрапляють серії, які чітко відрізняються як геолого-формаційним складом, так і особливостями регіонального метаморфізму. І для цього, крім ізотопних даних, немає жодних ні структурно-стратиграфічних, ні історико-геологічних підстав.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Артеменко Г.В., Шумлянський Л.В., Беккер А.Ю. U-Pb возраст (LA-ICP-MS) кластогенного циркона глееватской свиты Кривбасса (Украинский щит). *Геол. журн.* 2018. № 2 (363). С. 42–57.
- Артеменко Г.В., Шумлянський Л.В., Беккер А.Ю. Первые данные об эоархейских (3,95 млрд лет) породах в фундаменте Приазовского блока Украинского щита. *Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики: материалы тектон. совещ.* Москва: ГЕОС, 2020. Т. 1. С. 20–26.
- Бартницкий Е.Н., Нечаев С.В., Стульчиков В.А. Модельный возраст и некоторые генетические особенности галенитов Украинского щита. *Геохимия и рудообразование.* Киев: Наукова думка, 1985. Вып. 13. С. 13–23.
- Белевцев Р.Я. Проблемы метаморфической зональности докембрия. Киев: Наукова думка, 1975. 230 с.
- Белевцев Р.Я. Режим зонального прогрессивного метаморфизма в докембрии Украинского щита. Киев: Наукова думка, 1982. 152 с.
- Бибилова Е.В. Древнейшие породы Земли: изотопная геохронология и геохимия изотопов. *Минерал. журн.* 2004. Т. 26, № 3. С. 13–20.
- Бибилова Е.В., Клаэссон С., Федотова А.А., Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В., Кирнозова Т.И., Фугзан М.М., Ильинский Л.С. Изотопно-геохронологическое (U-Th-Pb, Lu-Hf) изучение цирконов архейских магматических и метасадочных пород Подольского домена Украинского щита. *Геохимия.* 2013. № 2. С. 99–121.
- Вревский А.Б. Архейские зеленокаменные пояса – геологические и изотопно-геохимические факты и геодинамические спекуляции. *Геология Карелии от архея до наших дней.* Петрозаводск, 2011. С. 33–36.
- Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой. Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Лесная И.М., Пономаренко А.Н., Шумлянський Л.В. Киев: Наукова думка, 2008. 239 с.
- Добрецов Н.Л. Специфика раннедокембрийского метаморфизма и ранняя история Земли. *Метаморфизм раннего докембрия.* Апатиты, 1980. С. 19–31.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Моралев В.М. Глобальная тектоника, магматизм и металлогения. Москва: Недра, 1976. 231 с.
- Карта фаций регионального метаморфизма Украинского щита масштаба 1:500 000. Объяснительная записка. Этингоф И.М., Щербаков И.Б., Сироштан Р.И., Белевцев Р.Я. Киев, 1982. 85 с.
- Каталог изотопных дат пород Украинского щита. Киев: Наукова думка, 1978. 224 с.
- Кирилюк В.П. Об особенностях седиментации, метаморфизма и геологической истории Земли в архее в свете современных представлений о природе Венеры. *Геол. журн.* 1971. Т. 31, № 6 (141). С. 42–54.
- Кирилюк В.П. Модель раннедокембрийского монофациального метаморфизма и ультраметаморфизма. *Геология метаморфических комплексов. Межвуз. науч.-темат. сб.* Вып. 6. Свердловск: Изд. УПИ, 1977. С. 40–47.
- Кирилюк В.П. О влиянии экзогенных факторов на температурный режим формирования раннедокембрийских метаморфических комплексов щитов. *Геология метаморфических комплексов. Межвуз. науч.-темат. сб.* Вып. 17. Екатеринбург: Уральский горный ин-т, 1991. С. 4–13.
- Кирилюк В.П. Тектоніка фундаменту Українського щита (Пояснювальна записка до «Тектонічної карти фундаменту Українського щита» масштабу 1:2 000 000). Київ: УкрДГРІ, 2007. 74 с.
- Кирилюк В.П. Особливості ранньодокембрийського метаморфізму та його зв'язку з тектонікою. *Геодинаміка.* 2013. № 1 (14). С. 82–97.
- Кирилюк В.П., Гайовський О.В. Регіональний метаморфізм та стратиграфія фундаменту Українського щита. Ст. 1. Стратиграфія і метаморфізм мегаблоків Українського щита. *Геол. журн.* 2022. № 4 (381). С. 3–30. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.4.261979>
- Кирилюк В.П., Гайовський О.В. Регіональний метаморфізм та стратиграфія фундаменту Українського щита. Ст. 2. Загальна геохронологічна шкала докембрію та стратиграфія Українського щита. *Геол. журн.* 2023. № 1 (382). С. 3–16. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.1.262162>
- Кирилюк В.П., Смоголюк А.Г. Об основных структурных элементах этажно-блоковой структуры Украинского щита. *Геол. журн.* 1993. № 3 (270). С. 54–69.
- Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита (пояснювальна записка). Єсипчук К.Ю., Бобров О.Б., Степанюк Л.М., Щербак М.П., Глеваський Є.Б., Скобелев В.М., Дранник А.С., Гейченко М.В. Київ: УкрДГРІ, 2004. 30 с.

- Лесная И.М., Легкова Г.В., Теплякова Н.В., Гринченко А.В. Цирконы из кварцитов с. Шамраевка (бугская серия). *Геохимия и рудообразование*. 1995. № 21. С. 69–73.
- Лобач-Жученко С.Б., Бибикина Е.В., Балаганский В.В., Сергеев С.А., Артеменко Г.В., Арестова Н.А., Щербак Н.П., Пресняков С.Л. Палеоархейские тоналиты в палеопротерозойской Орехово-Павлоградской коллизийной зоне Украинского щита. *Докл. РАН*. 2010. Т. 433, № 2. С. 212–218.
- Лобач-Жученко С.Б., Пономаренко А.М., Степанюк Л.М., Балаганский В.В., Сергеев С.А., Пресняков С.Л. Возраст цирконов из эндрбито-гнейсов Среднего Побужья (Днестровско-Бугский мегаблок Украинского щита). *Мінерал. журн.* 2011. Т. 33, № 1. С. 3–14.
- Лобач-Жученко С.Б., Балаганский В.В., Балтыбаев Ш.К., Степанюк Л.М., Пономаренко А.Н., Лохов К.И., Корешкова М.Ю., Юрченко А.В., Егорова Ю.С., Сукач В.В., Бережная Н.Г., Богомолов Е.С. Этапы формирования побужского гранулитового комплекса по данным изотопно-геохронологических исследований (Среднее Побужье, Украинский щит). *Мінерал. журн.* 2013. Т. 35, № 4. С. 87–99.
- Майерс Дж.С. Раннедокембрийский гнейсовый комплекс Гренландии. *Ранняя история Земли*. Москва: Мир, 1982. С. 176–188.
- Метаморфизм Украинского щита. Усенко И.С., Щербаков И.Б., Сироштан Р.И., Белевцев Р.Я., Этинггоф И.М., Щербакова Т.Г., Половко Н.И., Кравченко Г.Л., Яковлев Б.Г., Орс В.И., Вендиктов В.М., Зюльде В.В., Хворова Г.П., Билинская Я.П., Пийяр Ю.К., Голуб Е.Н., Рокачук Т.А., Есипчук К.Е., Ярошук М.А., Никулина Э.А., Кириллов С.П., Слензак С.И., Степченко С.Б., Шаркин О.П., Глевасский Е.Б., Минева В.Б., Батиевский Б.А. Киев: Наукова думка, 1982. 308 с.
- Общая стратиграфическая шкала нижнего докембрия России. Объяснительная записка. Апатиты. 2002. 13 с.
- Планета Венера (атмосфера, поверхность, внутреннее строение): Барсуков В.Л., Волков В.П. (отв. ред.). Москва: Наука, 1989. 482с.
- Савко К.А. Новая карта метаморфизма докембрия территории России масштаба 1:5 000 000. *Вестн. ВГУ. Сер. Геология*. 2013. № 2. С. 5–18
- Салоп Л.И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Ленинград: Недра, 1982. 343 с.
- Семенов Н.П., Щербак Н.П., Бартницкий Е.Н. Геохронологическое обоснование нижней возрастной границы криворожской серии. *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1974. № 11. С.18–30.
- Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В., Пономаренко О.М., Довбуш Т.І. До питання про вікові межі формування кошаро-олександрівської світи бузької серії Побужжя. *Геохімія та рудоутворення*. 2010. № 28. С. 4–10.
- Тугаринов А.И., Войткевич Г.В. Докембрийская геохронология материков. Москва: Недра, 1966. 387 с.
- Шульдинер В.И. Геотермический градиент в архее и условия формирования архейских комплексов. *Геология и геофизика*. 1976. № 2. С. 67–75.
- Шумлянський Л.В. Геохімія піроксенових плагіогнейсів (ендрбітів) Побужжя та ізотопний склад гафнію в цирконах. *Мінерал. журн.* 2012. Т. 34, № 2. С. 64–79.
- Eart's oldest rocks. Edited by: Martin J. Van Kranendonk, Hugh Smithies and Vickie Bennett. Elsevier, 2007. 1307 p.
- Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. The Geologic Time Scale 2012. Amsterdam: Elsevier, 2012. 1144 p.
- Hansen Vicki L. Venus: A Thin-Lithosphere Analog for Early Earth? *Earth's Oldest Rocks. Developments in Precambrian Geology*. 2007. Vol. 15. Elsevier: Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo. P. 987–1012.
- Knauth L.P., Epstein S. Hydrogen and oxygen isotope ratios in nodular and bedded cherts. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1976. Vol. 4, No. 9. P. 1095–1108.
- Oskwarek I., Perry E. Temperature limits of early Archaean ocean from oxygen isotope variations in the Isua supracrustal sequence, West Greenland. *Natur*. 1976. Vol. 259, No. 5540. P. 192–194.

Надійшла до редакції 31.07.2022

Надійшла у ревізованій формі 20.03.2023

Прийнята 20.04.2023

REFERENCES

- Artemenko G.V., Shumlyansky L.V., Bekker A.Yu. 2020. First data on Eoarchean (3.95 Ga) rocks in the basement of the Azov block of the Ukrainian Shield. *Fundamentalnyie problemyi tektoniki i geodinamiki. Materialy Tektonicheskogo soveschaniya*. Т. 1. Moscow: GEOS, pp. 20–26 (in Russian).
- Artemenko G.V., Shumlyansky L.V., Bekker A.Yu. 2018. U-Pb (LA-ICP-MS) age of detrital zircon from the hleyevatka suit of Kryvbass (the Ukrainian Shield). *Geologičnij žurnal*, 2 (363): 42–57 (in Russian).
- Bartnitsky E.N., Nechaev S.V., Stulchikov V.A. 1985. Model age and some genetic features of the galena of Ukrainian Shield. *Geohimiya i rudoobrazovanie*. Kyiv: Naukova Dumka. Iss. 13, pp. 13–23 (in Russian).
- Belevtsev R.Ya. 1975. Problems of metamorphic zoning of the Precambrian. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Belevtsev R.Ya. 1982. Mode of zonal progressive metamorphism in the Precambrian of the Ukrainian Shield. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).

- Bibikova E.V. 2004. The oldest Rocks of Earth: isotopic geochronology and geochemistry of isotopes. *Mineralogichnyy zhurnal*, 26, 3: 13–20 (in Russian).
- Bibikova E.V., Klaesson S., Fedotova A.A., Stepanyuk L.M., Shumlyanskiy L.V., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., Ilinskiy L.C. 2013. The isotopic-geochronological (U-Th-Pb, Lu-Hf) study of zircons of archean magmatic and metasedimentary rocks of the Podolsk domen of the Ukrainian Shield. *Geohimiya*, 2: 99–121 (in Russian).
- Catalog of isotopic dates for rocks of the Ukrainian Shield. 1978. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Correlation chronostratigraphic scheme of Early Precambrian of the Ukrainian Shield (explanatory note). 2004. Yesypchuk K.Yu., Bobrov O.B., Stepanyuk L.M., Scherbak M.P., Glevaskiy E.B., Skobelev V.M., Drannik A.S., Geychenko M.V. Kyiv: UkrDGRI (in Ukrainian).
- Dobretsov N.L. 1980. Specificity of the early Precambrian metamorphism and the early history of the Earth. *Metamorfizm rannego dokembriya*. Apatity, pp. 19–31 (in Russian).
- Earth's oldest rocks. 2007. Edited by: Martin J. Van Kranendonk, Hugh Smithies and Vickie Bennett. Elsevier.
- General stratigraphic scale of the Lower Precambrian of Russia. Explanatory note. 2002. Apatity (in Russian).
- Geochronology of Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Proterozoic. 2008. Shcherbak N.P., Artemenko G.V., Lesnaya I.M., Ponomarenko A.N., Shumlyanskiy L.V. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. 2012. The Geologic Time Scale. Amsterdam: Elsevier.
- Hansen Vicki L. 2007. Venus: A Thin-Lithosphere Analog for Early Earth? *Earth's Oldest Rocks. Developments in Precambrian Geology*. 15. Elsevier: Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo, pp. 987–1012.
- Knauth L.P., Epstein S. 1976. Hydrogen and oxygen isotope ratios in nodular and bedded cherts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4, 9: 1095–1108.
- Kyrylyuk V.P. 1991. On the influence of exogenous factors on the temperature regime of the formation of Early Precambrian metamorphic complexes of shields. *Geologiya metamorficheskikh kompleksov. Mezhvuzovskiy nauchnyi tematicheskij sbornik*. 17. Yekaterinburg: Ural Mining Institute, pp. 4–13 (in Russian).
- Kyrylyuk V.P. 1971. On the features of sedimentation, metamorphism and geological history of the Earth in Archean in the light of modern ideas about nature of Venus. *Geologichnij zhurnal*, 31, 6 (141): 42–54 (in Russian).
- Kyrylyuk V.P. 1977. Model of the monofacies metamorphism and ultrametamorphism of the Early Precambrian. *Geologiya metamorficheskikh kompleksov. Mezhvuzovskiy nauchnyi tematicheskij sbornik*. Iss. 6. Sverdlovsk: UPI press, pp. 40–47 (in Russian).
- Kyrylyuk V.P. 2007. Tectonics of the basement of the Ukrainian Shield. Explanatory note to the «Tectonic map of the basement of the Ukrainian Shield» on a scale of 1:2 000 000. Kyiv: UkrDGRI (in Ukrainian).
- Kyrylyuk V.P. 2013. Peculiarities of early Precambrian metamorphism and its connection with tectonics. *Geodynamika*, 2 (13): 82–97 (in Ukrainian).
- Kyrylyuk V.P., Gajovskiy O.V. 2022. Regional metamorphism and stratigraphy of the basement of Ukrainian Shield. Article 1. Stratigraphy and metamorphism of megablocks of the Ukrainian Shield. *Geologichnij zhurnal*, 4 (381): 3–30. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.4.261979> (in Ukrainian).
- Kyrylyuk V.P., Gajovskiy O.V. 2023. Regional metamorphism and stratigraphy of the basement of Ukrainian Shield. Article 2. General geochronological scale of the Precambrian and stratigraphy of the Ukrainian Shield. *Geologichnij zhurnal*, 1 (382): 3–16. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.1.262162> (in Ukrainian).
- Kyrylyuk V.P., Smogolyuk A.G. 1993. On the main structural elements of the floor-block structure of the Ukrainian Shield. *Geologichnij zhurnal*, 3 (270): 54–69 (in Russian).
- Lesnaya I.M., Legkova G.V., Teplyakova N.V., Grinchenko A.V. 1995. Zircons from quartzites of the Shamrayevka village (Bug series). *Geohimiya i rudoobrazovanie*, 21: 69–73 (in Russian).
- Lobach-Zhuchenko S.B., Balaganskiy V.V., Baltybayev Sh.K., Stepanyuk L.M., Ponomarenko A.N., Lokhov K.I., Koreshkova M.Yu., Yurchenko A.V., Yegorova Yu.S., Sukach V.V., Berezhnaya N.G., Bogomolov Ye.S. 2013. Stages of Formation of the Bug Area Granulite Complex by the Data of Isotopic-Geochronological Investigations (the Middle Bug Area, the Ukrainian Shield). *Mineralogicheskij zhurnal*, 35, 4: 87–99 (in Russian).
- Lobach-Zhuchenko S.B., Bibikova E.V., Balagansky V.A., Sergeev S.A., Artemenko G.V., Arestova N.A., Shcherbak N.P., Presnyakov S.L. 2010. Paleoproterozoic tonalites in the Paleoproterozoic Orekhovo-Pavlograd collision zone of the Ukrainian Shield. *Reports of RAS*, 433, 2: 212–218 (in Russian).
- Lobach-Zhuchenko S.B., Stepanyuk L.M., Ponomarenko A.N., Balaganskiy V.V., Sergeev S.A., Presnyakov S.L. 2011. Age of Zircons from Enderbite-Gneisses of the Middle Bug Area (Dniester-Bug Megablock of the Ukrainian Shield). *Mineralogicheskij zhurnal*, 33, 1: 3–14 (in Russian).
- Map of the facies of regional metamorphism of the Ukrainian Shield, scale 1:500 000. Explanatory note. 1982. Etingof I.M., Shcherbakov I.B., Sirosthan R.I., Belevtsev R.Ya. Kyiv (in Russian).
- Metamorphism of the Ukrainian Shield. 1982. Usenko I.S., Shcherbakov I.B., Sirosthan R.I., Belevtsev R.Ya., Etingof I.M., Shcherbakova T.G., Polovko N.I., Kravchenko G.L., Yakovlev B.G., Orsa V.I., Venidiktov V.M., Zyltsle V.V., Khvorova G.P., Bilynskaya Ya.P., Piyyar Yu.K., Golub E.N., Rokachuk T.A., Esipchuk K.E., Yaroshchuk M.A., Nikulina E.A., Kirillov S.P., Slenzak S.I., Stepchenko S.B., Sharkin O.P., Glevasskiy E.B., Mineyeva V.B., Batiyevskiy B.A. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).

- Myers J.S. 1982. Early Precambrian Gneiss Complex of Greenland. *Rannyya istoriya Zemli*. Moscow: Mir, pp. 176–188 (in Russian).
- Oskwarek I., Perry E. 1976. Temperature limits of early Archaean ocean from oxygen isotope variations in the Isua supracrustal sequence, West Greenland. *Natur*, 259, 5540: 192–194.
- Planet Venus (atmosphere, surface, internal structure). 1989. Responsible editors V.L. Barsukov, V.P. Volkov. Moscow: Nauka (in Russian).
- Salop L.I. 1982. Geological development of Earth in Precambrian. Leningrad: Nedra (in Russian).
- Savko K.A. 2013. New map of Precambrian metamorphism in Russia, scale 1:5 000 000. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Ser. Geologiya*, 2: 5–18 (in Russian).
- Semenenko N.P., Shcherbak N.P., Bartnitsky E.N. 1974. Geochronological substantiation of the lower age limit of the Krivoy Rog series. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya*, 11: 18–30 (in Russian).
- Shuldiner V.I. 1976. Geothermal gradient in the Archaean and conditions for the formation of Archean complexes. *Geologiya i geofizika*, 2: 67–75 (in Russian).
- Shumlyansky L.V. 2012. Geochemistry of pyroxenepagioclase gntisses (enderbites) of the Bug rea and Hf isotope composition in zircons. *Mineralogicheskij zhurnal*, 34, 2: 64–79 (in Ukrainian).
- Tugarinov A.I., Voitkevich G.V. 1966. Precambrian geochronology of the continents. Moscow: Nedra (in Russian).
- Vrevsky A.B. 2011. Archean greenstone belts – geological and isotope-geochemical facts and geodynamic speculations. *Geologiya Karelii ot arheya do nashih dney*. Petrozavodsk, pp. 33–36 (in Russian).
- Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Moralev V.M. 1976. Global tectonics, magmatism and metallogeny. Moscow: Nedra (in Russian).

Received 31.07.2022

Received in revised form 20.03.2023

Accepted 20.04.2023

Regional metamorphism and stratigraphy of the basement of the Ukrainian Shield.

Article 3. Features of lithogenesis and metamorphism of the Early Precambrian complexes and their duration

V.P. Kyrylyuk, O.V. Gaiovskyi

Ivan Franko Lviv National University, Lviv, Ukraine

E-mail: Kyrylyuk.V@i.ua; ogayovskyi@gmail.com

The stratigraphic dismemberment of the Lower Precambrian has always been inextricably linked with the study of metamorphism. The degree of metamorphism of the complexes was even used for some time as an indication of their relative age. This sign was not confirmed by isotope dating and was no longer taken into account in the stratigraphic dismemberment of the basement of the shields, including the preparation of official stratigraphic schemes of the Precambrian of the Ukrainian Shield.

The authors of the article believe that the degree of metamorphism can still be used in developing the stratigraphy of the Ukrainian Shield. The possibility of such use of metamorphism is considered in a series of publications. The first article describes the stratigraphy and metamorphism of all megablocks of the Ukrainian Shield. It is shown that older stratigenic complexes in each of the megablocks are characterized by higher temperature metamorphism. At the same time, the distinctive features of the composition and metamorphism of the stratigenic complexes, according to the authors, are a reflection of large successive stages of the geological development of the Ukrainian Shield in the Early Precambrian and can serve as the basis for compiling a regional stratigraphic scheme on a historical-geological basis. A version of the regional stratigraphic scheme of the Ukrainian Shield on a historical-geological basis, compiled at the level of complexes, proposed in the second article of the series. In this final article of the cycle, the conditions and duration of lithogenesis and accompanying metamorphism of various sequentially formed stratigenic complexes of the Lower Precambrian are considered. The idea is put forward that the initial pre-metamorphic composition of the complexes and their metamorphism are determined by the temperature state of the upper shells of the Earth and their directed thermalevolution at the early stages of geological history. The existence of hydrospheric, early thermohydrospheric, late thermohydrospheric and normohydrospheric global stages of lithogenesis, lasting from 300 to 700 Ma, and continuous metamorphism from 3.8 to 2.0–1.9 Ga are assumed. During this time, a single metamorphic (paleotemperature) zoning of the basement of the Ukrainian Shield was formed, in which all stratigenic complexes of different ages participate.

Keywords: regional metamorphism; stratigraphy; geochronology; Lower Precambrian; Ukrainian Shield.

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273768>
UDC 551.491.4

Spatial and temporal features of water chemistry changes in the quaternary unconfined aquifers of the Dnipro River basin

N.G. Lyuta^{1*}, I.V. Sanina²

¹NNI “Institute of Geology”, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
E-mail: nlyuta@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4070-0944>

²SD Ukrainian Geological Research Institute, SE Ukrainian Geological Company, Kyiv, Ukraine
E-mail: ekogeol@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6592-9625>

* Corresponding author

The article deals with the chemical composition of uppermost aquifers water in the Dnipro River basin. Its study is necessary not only in connection with the implementation the requirements of the EU Water Framework Directive methodological documents in the groundwater monitoring, but primarily because of water supply from these aquifers to rural areas. Unconfined aquifers water is characterized by a complex and heterogeneous chemical composition due to natural and anthropogenic factors. Natural hydrochemical zoning is distinctly visible on the territory of the Dnipro basin. A number of chemical elements and compounds in the water are contained in concentrations exceeding the standards for drinking water established by the State sanitary norms and rules 2.2.4-171-10 “Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption” in the natural state. In addition, unconfined aquifers are subject to significant anthropogenic impact, as they are unprotected from pollution. Comparison of the data on total dissolved solids (TDS) and anionic composition of groundwater obtained during hydrogeological surveys in the period 1965–1975 and 2009–2013 on three sheets of the hydrogeological map (scale 1:200,000) in different sub-basins of the Dnipro River showed the widespread deep changes in groundwater chemical composition. In addition to a significant anthropogenic pressure, groundwater is significantly affected by climatic factors. Over a forty-year period, TDS in the north of the Dnipro basin increased by 50 %, in the central and southern parts – twice, due to an increase in the content of sulfates and chlorides. Within the analyzed areas in the Middle and Lower Dnipro sub-basins, nitrate pollution of unconfined aquifers is almost widespread. Thus, in a large area, waters of these aquifers are unsuitable for drinking water supply due to the excessive content of chemical elements and compounds of natural and anthropogenic origin. Therefore, one of the priorities of the post-war reconstruction of Ukraine should be the transfer of the rural population to water supply from protected confined aquifers and the improvement of sanitary conditions in rural areas.

Keywords: groundwater; unconfined aquifers; conditions of formation; qualitative state; TDS; Dnipro River basin.

Citation: Lyuta N.G., Sanina I.V. 2023. Spatial and temporal features of water chemistry changes in the quaternary unconfined aquifers of the Dnipro River basin. *Geologіchnij žurnal*, 2 (383): 30–39. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273768>

Цитування: Люта Т.Г., Саніна І.В. Просторово-часові особливості змін хімічного складу вод безнапірних водоносних горизонтів у четвертинних відкладах басейну Дніпра. *Геологічний журнал*. 2023. № 2 (383). С. 30–39. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273768>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Introduction

One of the urgent tasks of Ukraine in the near post-war future will be the State groundwater monitoring system reforming, taking into account international experience and the requirements of European Water Framework Directive 2000/60/EC. In the European Guidelines for Groundwater Monitoring (CIS..., 2007), considerable attention is paid to studying the status of unconfined aquifers, given their vulnerability to pollution, as well as the close connection with surface ecosystems and underlying confined aquifers. For Ukraine, the research of unconfined aquifers qualitative status is of particular importance, since they are widely used for individual water supply in rural settlements.

Unfortunately, representative State groundwater monitoring network of observation wells existed from the 1950s to the 1990s, as of 2023 has suffered significant losses due to insufficient funding over the past few decades and was finally liquidated as a result of the Russian aggression. Therefore, adaptation of monitoring to European requirements should occur simultaneously with the restoration of the monitoring network.

Materials and methods

To ensure the representativeness of the observation network and scientifically based planning of monitoring program activities, it is necessary to

collect and analyze available information on the groundwater status. This work was initiated in 2019–2021 as part of the Water Initiative Plus program for the Eastern Partnership countries, which aimed to create a framework for the resumption of groundwater monitoring, considering the requirements of the European methodological documents, especially the implementation of the basin principle of water resources management. In particular, groundwater bodies in the Dnipro basin were identified and their qualitative and quantitative status, vulnerability and risks of failure to achieve their environmental objectives were preliminarily characterized (Goshovsky et al., 2019; Lyutyi et al., 2021; Lyuta, Sanina, 2022). The information support of these works was carried out on the basis of data accumulated in geological enterprises of Ukraine, published maps of different scales and the hydrogeological information database created in the Ukrainian State Geological Research Institute.

In the absence of monitoring data, water quality changes were estimated approximately by comparing the multi-temporal data from the 1:200,000 scale hydrogeological surveys of the 1970s and the results of the subsequent hydrogeological follow-up study conducted in 2009–2013. The minimum, maximum and mean TDS values were compared. Waters were grouped according to the predominant anions and the minimum, maximum and median TDS were determined for these groups (Tables 1–3).

Table 1. Changes in TDS and anionic composition of groundwater in the Pripyat sub-basin (hydrogeological map at scale 1:200,000, sheet Korosten)

Year	TDS (g/l), min-max mean	TDS in groups of waters with predominant anions (g/l),				
		min-max median				
		HCO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻ Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ SO ₄ ²⁻ Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ Cl ⁻	Cl ⁻
1971	0.1–1.2 0.39	0.2–0.4 0.4	0.1–1.2 0.3	0.2–0.7 0.4		0.3–0.7 0.4
		Number of wells				
		8	16	8	0	5
2010	0.1–2.9 0.59	0.4–0.9 0.6	0.2–0.5 0.4	0.3–2.9 0.6	0.4–1.1 0.7	0.2–1.0 0.6
		Number of wells				
		7	8	15	5	6
		Contaminated with nitrates (above 50 mg/l)				
		0	0	4	2	2

Table 2. Changes in TDS and anionic composition of groundwater in the Middle Dnipro sub-basin (hydrogeological map at 1:200,000 scale, sheet Pereyaslav-Khmelnitskyi)

Year	TDS (g/l), min-max mean	TDS in groups of waters with predominant anions (g/l), min-max median				
		HCO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻ SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻ Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ SO ₄ ²⁻ Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ NO ₃ ⁻
1965	0.2–4.0 0.84	0.2–2.0 0.5		0.6–4.0 1.8		
		Number of wells				
		39	0	10	0	0
2009	0.3–9.2 1.8	0.3–1.7 1.1	1.2–9.2 1.8	2.4–2.6 2.5	1.6–4.3 3.2	0.9–2.8 2.3
		Number of wells				
		21	4	2	6	5
		Contaminated with nitrates (above 50 mg/l)				
		14	4	1	6	5

Table 3. Changes in TDS and anionic composition of groundwater in the Lower Dnipro sub-basin (hydrogeological map at scale 1:200,000, sheet Dnipropetrovsk)

Year	TDS (g/l), min-max mean	TDS in groups of waters with predominant anions (g/l), min-max median				
		HCO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻ SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ Cl ⁻
1973	0.2–3.6 1.46	0.2–0.7 0.4	0.4–1.2 0.7	0.9–2.2 1.3	1.2–3.6 2.8	-
		Number of wells				
		4	11	8	9	0
2012	0.8–9.1 2.7	1.0–1.7 1.3	1.2–1.6 1.4	1.3–2.5 2.0	2.0–7.0 3.9	2.4–9.1 4.3
		Number of wells				
		3	6	11	10	6
		Contaminated with nitrates (above 50 mg/l)				
		1	3	6	8	6

Natural conditions of the territory

The area of the Dnipro basin in Ukraine is 291,400 km², or 48 % of the total area of the country, the basin fully or partially covers the territory of 19 administrative regions. Its territory is characterized by complex natural and anthropogenic conditions. The Dnipro basin is located within three sublatitudinal bioclimatic zones – Polissya (marshy woodlands), Forest-Steppe and Steppe. The territory of the basin is the southwestern part of the East European Plain, which consists of upland and

lowland areas. In the north of the basin the surface absolute marks are 135–500 m, in the south – 10–150 m. The climate is generally temperate continental, from moderately cold in the north to moderately warm in the south. The geological structure of the Dnipro basin area is complex, consisting of the Ukrainian Shield, Volyno-Podilska Plate, Dni-provsko-Donetska Depression, South Ukrainian Monocline and the Folded structure of the Donbas.

Quaternary sediments cover almost the entire territory of the Dnipro basin and form the upper floor of the geological cross-section. The upper-

most aquifers are confined to them. According to the lithological and genetic characteristics of the Quaternary rocks, aquifers are distinguished in the territory of the Dnipro basin in marsh, alluvial, water-glacial sediments, water-glacial and aeolian-deluvial sediments and in aeolian-deluvial sediments.

Unconfined aquifers in Quaternary sediments

The aquifer in marsh Quaternary sediments is widespread in Polissya, in floodplains and relief depressions (Fig. 1). Water-bearing sediments are represented mainly by peat, fine-grained sands, sandy loams and loams. The thickness of the aquifer is 0.5–6.0 m; the depth is 0.4–0.7 m. This aquifer is hydraulically connected with the aquifer in Quaternary alluvial sediments and with surface water bodies.

The chemical composition of water is mixed: anions are represented by sulfates, chloride, hydrocarbonates and nitrates in various proportions. The water is unpleasant in taste and smell, yellow-brown in color, contains a large amount of iron and ammonia. TDS is 0.1–0.7 g/l; hydrogen index from 5.2 to 6.8; total hardness is 1.9–5.4 mmol/l. Poor quality of groundwater makes the aquifer unsuitable for drinking water supply.

The aquifer in alluvial Quaternary sediments is common within the floodplains and terraces of the Dnipro River and its tributaries (see Fig. 1). Water-bearing rocks are fine- and medium-grained sands. The thickness varies from 10–20 m in the valleys of small rivers to 50–60 m in the Dnipro floodplain. Depth of occurrence depending on the relief varies from 2–4 to 5–15 m. Well flow rates reach 173–432 m³/day.

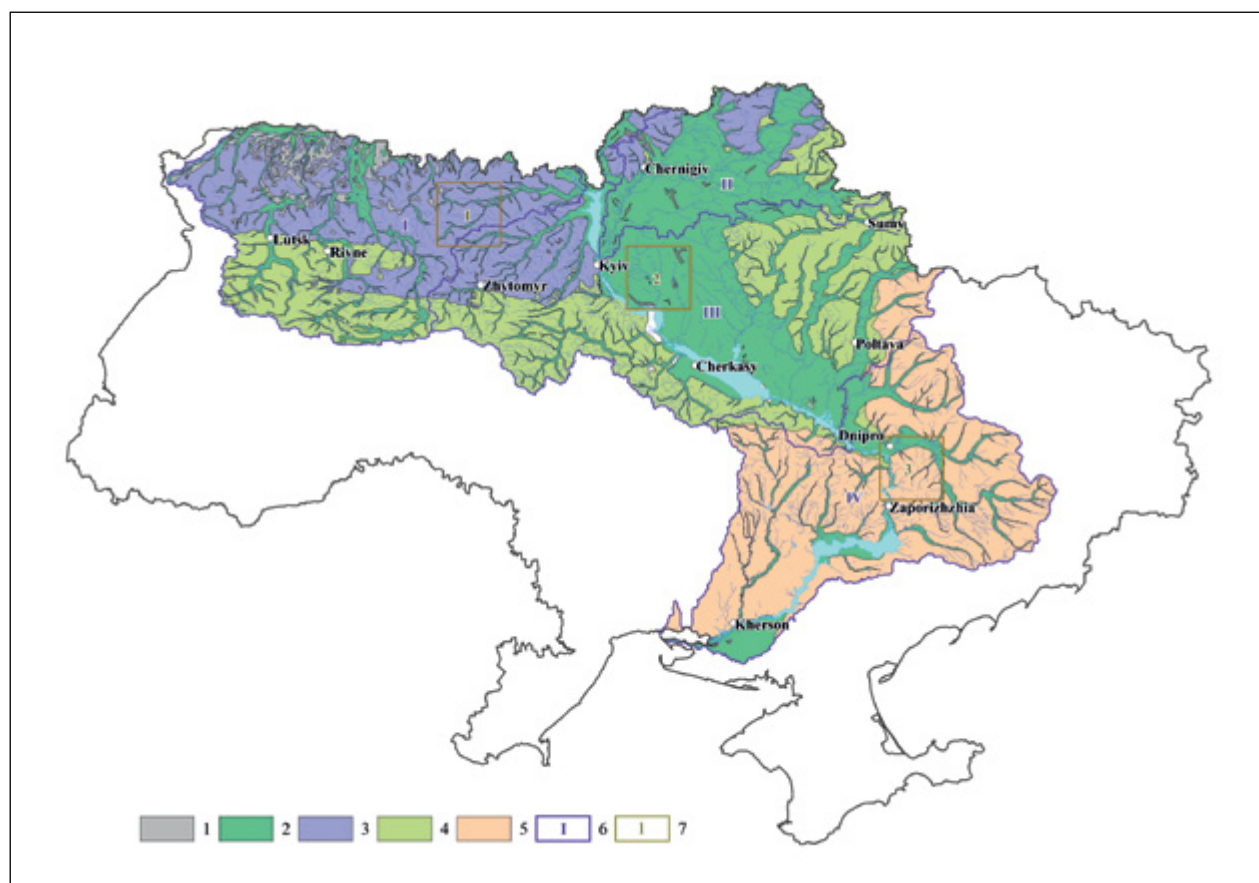


Fig. 1. Unconfined aquifers in the Dnipro River basin

Unconfined aquifers: 1 – aquifer in marsh Quaternary sediments; 2 – aquifer in alluvial Quaternary sediments; 3 – aquifer in water-glacial Quaternary sediments; 4 – aquifer in water-glacial and aeolian-deluvial Quaternary sediments; 5 – aquifer in aeolian-deluvial Quaternary sediments. 6 – Sub-basin boundaries: I – Prypiat; II – Desna and Upper Dnipro; III – Middle Dnipro; IV – Lower Dnipro. 7 – Areas of the sheets of the hydrogeological map at a scale of 1:200,000; 1 – Korosten; 2 – Pereyaslav-Khmelnytskyi; 3 – Dnipropetrovsk

The predominant components of the chemical composition are hydrocarbonate, magnesium and calcium, TDS ranges from 0.1 to 1.3 g/l. The water is characterized by high iron content – up to 2–3 mg/l.

The aquifer in water-glacial Quaternary sediments is widespread within the moraine and sand plain in the north of the basin (see Fig. 1). Water-bearing rocks are sands of different grains, mostly fine-grained. The thickness varies from 3–25 m on the right bank to 70 m on the left bank. The water table depth is mainly 2–7 m. Water abundance depends on lithology of water-bearing rocks; well flow rates vary from 0.4–216 to 259–1000 m³/day.

Chemical composition is varied: hydrocarbonate, chloride-hydrocarbonate, sulfate-hydrocarbonate. The predominant cations are calcium, occasionally magnesium and sodium. TDS varies from 0.3 to 1.8 g/l, mostly does not exceed 0.5 g/l, iron content in the water is up to 0.1–0.8 g/l.

The aquifer in water-glacial and aeolian-deluvial Quaternary sediments is widespread in the watersheds of the Middle Dnipro sub-basin and in some areas of the Volyn Upland (see Fig. 1). The lower part of the water-bearing rocks is represented by water-glacial multi-grained sands, the upper part – by aeolian-deluvial loams and sandy loams. Thickness of water-bearing sediments is unstable and varies from 2 to 32 m. The depth of groundwater level is mainly 5–12 m. The lower part of sediments is more water abundant. Specific flow rates of wells vary from 0.9 to 345.6 m³/day.

Water is calcium hydrocarbonate, calcium hydrocarbonate-chloride and calcium-magnesium with TDS of 0.3–0.7 g/l.

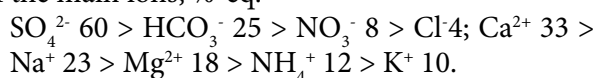
The aquifer in aeolian-deluvial Quaternary sediments is located in the watersheds of the southern part of the Dnipro basin (see Fig. 1). Water-bearing are loams, sandy loams, loess-like loams with thickness from 1 to 30 m. Depth of water table is from 1 to 21 m. The aquifer is low-water-bearing. Well flow rates vary from 0.77 to 20.3 m³/day. The aquifer is distributed in a zone of insufficient moisture, so there is a natural process of continental salt accumulation in the soils and rocks of the aeration zone, which, in turn, causes an increase in water TDS. Sulfates and chlorides predominate among anions, and TDS often exceeds the normative value, up to 3–10 g/l.

All the listed aquifers (except for marsh waters) are used for domestic needs of the rural population, mainly by means of shallow wells.

Peculiarities of formation, contamination and trend of water quality change

All unconfined aquifers are recharged by infiltration, mainly by precipitation; overflow from surface water bodies, as well as from adjacent aquifers.

According to long-term observations at 12 meteorological stations in the Dnipro basin (Osadchyi et al., 2008), the TDS of atmospheric water ranges from 10.0 to 36.0 mg/l, mainly 20.0 mg/l. The chemical composition of atmospheric water is sustained and characterized by the following ratio of the main ions, %-eq:



No spatial patterns of TDS distribution and chemical composition of precipitation in the Dnipro basin are observed.

As for surface waters, they are subject to a clear natural geographical zonation, and their TDS in the Dnipro basin varies widely. In water of the Pripyat River tributaries, the Ubort and the Uzh rivers, TDS is the lowest – 0.2 g/l. TDS of the Dnipro tributaries elevates significantly from north to south, in the northern part of the basin it is 0.32–0.38 in the Desna water, while in the Sula, the Psel and the Vorskla it reaches 0.7–0.9 g/l (Vyshnevskiy, Kosovets, 2003). Thus, even the lowest TDS of river water is ten times higher than that of atmospheric water.

The map of surface water TDS (Fig. 2) evidences in favor of the climatic factor in the formation of their qualitative composition. The boundary between surface waters with TDS lower and greater than 1.0 g/l corresponds to the boundary of leaching and continental salinization zones, or the boundary of insufficient and sufficient moisture zones. The chemical composition of surface waters in the north of the basin is hydrocarbonate calcium, in the southern part it changes to variegated with predominance of sulfate and sodium ions.

It should be noted that the nature of the distribution of macro- and microcomponents in surface waters is significantly different; it is quite natural that macrocomponents are distributed much more evenly both in space and time. Based on long-term observations (Osadchyi et al., 2008), in the water of the Dnipro cascade reservoirs over a 15-year period, the minimum average annual TDS differed from the maximum by 30 %, while for zinc and copper this

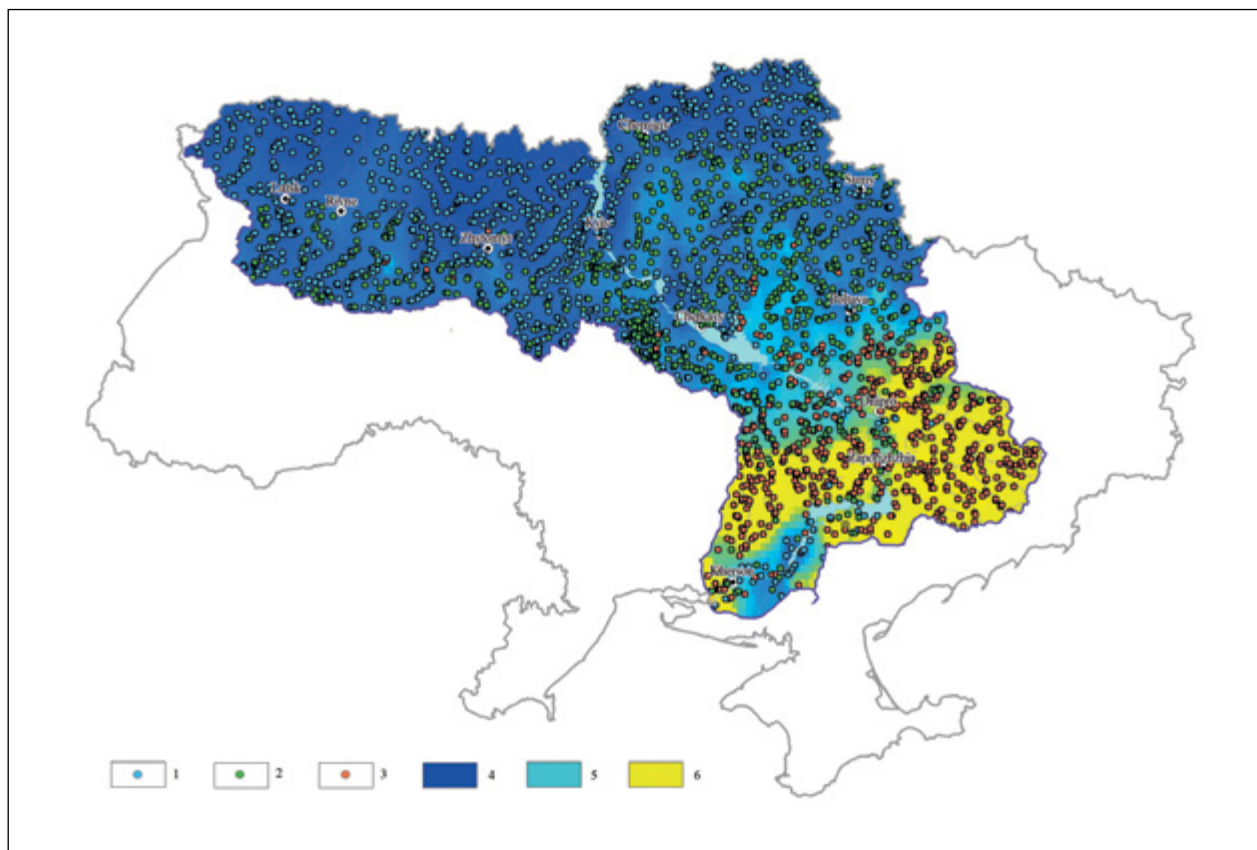


Fig. 2. Surface water TDS in the Dnipro River basin

Sampling points of surface watercourses with TDS: 1 – $< 0.5 \text{ g/l}$; 2 – $0.5\text{--}1.0 \text{ g/l}$; 3 – $> 1.0 \text{ g/l}$

Area distribution of surface water with TDS: 4 – $< 0.5 \text{ g/l}$; 5 – $0.5\text{--}1.0 \text{ g/l}$; 6 – $> 1.0 \text{ g/l}$

indicator is 6 and 15 times, respectively. This feature is explained by purely natural factors – uniform distribution of macrocomponents in rock-forming minerals and extremely uneven distribution of microcomponents, in particular metals.

In groundwater, the natural geographical hydrochemical zonation is even more contrasting, reflecting the additional influence of the basin's rocks material composition. In the groundwater of Polissya, TDS is lower than 0.5 g/l , while within the Lower Dnipro sub-basin it is more than 3.0 , sometimes up to 10.0 g/l .

In addition to TDS and macrocomponent content, groundwater often contains elevated natural concentrations of microcomponents that exceed the standards established by the State sanitary norms and rules 2.2.4-171-10 “Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption”. This primarily concerns iron and manganese within the Ukrainian Shield, which are widespread in organic-rich groundwater of Polissya. In addition, within the Ukrainian Shield, groundwater some-

times contains elevated content of lead (up to $0.032\text{--}0.09 \text{ mg/l}$) and beryllium (up to $0.29\text{--}0.64 \mu\text{g/l}$), which corresponds to the hydrogeochemical specification of this region.

The varied natural conditions of groundwater quality formation are complicated by intensive anthropogenic impact. An important aquifers characteristic is their protection from the surface pollution. To assess the protection of the uppermost aquifer the authors analyzed the aeration zone thickness and lithological structure and compiled a GIS-map of Ukraine's territory, a fragment of which is shown in Fig. 3. According to the existing criteria (Migulya et al., 1981), all uppermost aquifers in Ukraine are unprotected because they are not overlain by a clay layer of more than 10 m , and differ only in the time of pollutants penetration from the surface. Using the data on the thickness of various lithological layers of the aeration zone and filtration coefficients, the time of penetration of neutral contaminant with infiltration flow was approximately determined. According to these

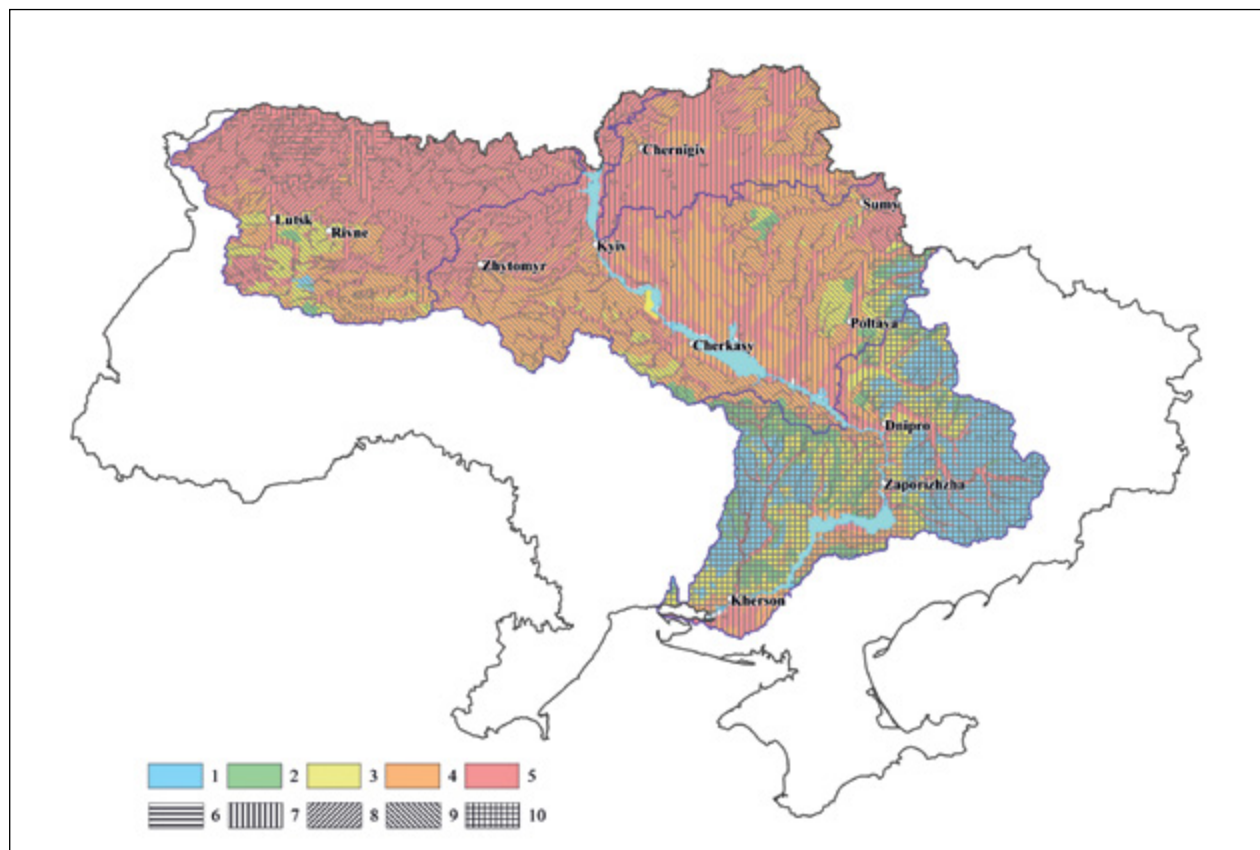


Fig. 3. Time of possible penetration of pollutants into groundwater, days: 1 – > 3000; 2 – 1000–3000; 3 – 250–1000; 4 – 50–250; 5 – 0–50. Unconfined aquifers: 6 – aquifer in marsh Quaternary sediments; 7 – aquifer in alluvial Quaternary sediments; 8 – aquifer in water-glacial Quaternary sediments; 9 – aquifer in water-glacial and aeolian-deluvial Quaternary sediments; 10 – aquifer in aeolian-deluvial Quaternary sediments

estimates, the uppermost aquifers vary in the time of penetration of pollutants from the surface with infiltration water (see Fig. 3): from 0–50 days in the north to 2000–3000 days in the south of the Dnieper basin (Sanina et al., 2005). Such natural conditions combined with intensive and long-lasting anthropogenic pressure resulted in large-scale groundwater pollution.

The most significant anthropogenic impact on unconfined aquifers throughout the Dnipro River basin is caused by diffuse sources of pollution within agricultural lands due to the use of mineral fertilizers and pesticides, irrigation and discharges of polluted wastewater into surface water bodies.

The detection of large areas of nitrate pollution indicates a steady trend towards their accumulation in groundwater. Given the significant demand for food products on the world market, the volume of agricultural production will grow and the use of fertilizers and pesticides will increase. Therefore, we should expect an increase in the pressure from diffuse sources of pollution within agricultural lands.

The problem of pollution with organic compounds and nitrates is exacerbated within rural settlements, where the population uses decentralized wastewater disposal systems (septic tanks and cesspools). According to the regional centers for disease control and prevention in different regions of Ministry of Health in Ukraine, cases of acquired methemoglobinemia are periodically reported due to the use of water from wells for the preparation of infant formula, and in such cases the nitrate content exceeded the standard (50 mg/l) by 10 or more times. Considering open-source information (Nitrate..., 2018) that cases of an acquired methemoglobinemia also occur at fairly low nitrate levels (above 10 mg/l), this situation looks threatening.

Another concern is the fact that oil products and pesticides have become common pollutants in unconfined aquifers. Pollution by oil products is spotty, and pesticides are mainly recorded in the southern regions, where their appearance is facilitated by irrigation (State..., 2021).

In the area of mining facilities influence in the sub-basins of the Middle and Lower Dnipro (mining areas of Dnipro, Zaporizhzhia, Donetsk and Poltava regions), the violation of natural hydrochemical conditions is associated with discharges of highly saline drainage and mine waters. In areas with a high level of industrial development and dense construction, changes in the quality composition of groundwater are observed. Here, unconfined aquifers are vulnerable to the impact of wastewater from chemical and metallurgical enterprises, industrial sites and tailing dumps of mining and processing plants. In these places (cities of Kamianske, Dnipro, Zaporizhzhia), waters of unconfined aquifers have high TDS (up to 3.4–8.6 g/l), elevated content of sulfates, chlorides, and high water hardness.

The most considerable changes in groundwater quality were recorded as a result of the Kryvyi Rih iron ore deposit development in the Lower Dnipro sub-basin, which affects not only unconfined, but also the underlying confined aquifers. The total area of uppermost aquifers groundwater contamination in the Kryvbas region is 300 km² with TDS up to 12.3 g/l. Groundwater in this area is characterized by a high concentration of sulfates, chlorides, iron (up to 2.9 mg/l), strontium (up to 16.6 mg/l), bromine (up to 47.4 mg/l), manganese (up to 26.1 mg/l) (State..., 2021).

These data confirm the conclusions of previous studies that the waters of the uppermost aquifer in most of its distribution area do not meet the requirements of current quality standards by one or more indicators (Shestopalov et al., 2005).

Hydrochemical characteristics of the uppermost aquifers are variable both in space and time. To assess changes in water quality over time, we compared the sheets of the hydrogeological map of scale 1:200,000 Korosten, Pereyaslav-Khmelnytsky and Dnipropetrovsk, located respectively in the sub-basins of Pripyat, Middle and Lower Dnipro. It should be noted that different map sheets are unequally provided with hydrochemical information. Therefore, only the data available on all sheets and for both time periods were compared, namely TDS and anionic composition of water.

In the north of the Dnipro basin, in the Pripyat sub-basin, information from hydrogeological maps for 1971 and 2010 was compared for 37 and 41 wells, respectively, in the Korosten sheet (see Fig. 1). Here, the most common aquifers are in water-glacial and alluvial Quaternary sediments.

During this period, the mean TDS elevated by 50%, increasing from 0.39 (from 0.1 to 1.2 g/l) to 0.59 (from 0.1 to 2.9 g/l). In the natural state, groundwater in this area is characterized by low TDS and predominance of hydrocarbonates and chlorides in the anionic composition. Over the 40-year period, TDS increased mainly due to chlorides and sulfates, the amount of three-component anionic composition doubled (see Table 1). The anthropogenic origin of this growth is evidenced by the fact that nitrate contamination of water, recorded in a quarter of the tested wells, shows a clear correlation with waters of chloride and three-component anionic composition.

Hydrogeological maps of the Pereyaslav-Khmelnytskyi sheet (the Middle Dnipro sub-basin) at a scale of 1:200,000 (see Fig. 1) for 1965 and 2009 were compared for by studying the chemical composition of water in 49 and 38 wells, respectively, which exploit mainly the aquifer in alluvial Quaternary sediments. More significant changes have occurred here, with groundwater TDS more than doubling over a 44-year period, from 0.84 to 1.8 g/l. The anionic composition of water has undergone significant changes. The number of water points with natural hydrocarbonate water composition has almost halved, while the number of wells with water of mixed composition has significantly increased (see Table 2).

Agrarian specificity of the territory affected the significant nitrate contamination. Out of 38 tested wells, 30 contain water with excessive nitrate content. In five wells, the content of nitrates reached such values that they together with hydrocarbonates form the main anionic composition of water. Wells with nitrate content below the maximum permissible concentration spatially tend towards the river network, while in watersheds the nitrate content in water increases.

In the territory of the Lower Dnipro sub-basin (Dnipropetrovsk sheet, see Fig. 1), hydrogeological maps drawn up in 1973 and 2012 were analyzed (respectively, data on 32 and 36 wells were compared, which mainly exploit aquifers in aeolian-deluvial and alluvial Quaternary sediments). The analysis showed that over a 40-year period groundwater TDS increased by an average of 1.8 times (see Table 3). As of 1973, it was 0.2–3.6, mainly 1.46 g/l, and the anionic composition was dominated by hydrocarbonates and sulfates. After 40 years, groundwater TDS is 0.8–9.1, averaging

2.7 g/l, and the role of sulfates and chlorides in the anionic composition increased significantly. Nitrate pollution is widespread, the content of sulfates and nitrates exceeds the MPC in 2/3 of the tested wells.

Thus, changes in the TDS and chemical composition of groundwater over the past 40 years have occurred throughout the Dnipro basin, even in the north, where the highest amount of precipitation and the lowest anthropogenic pressure is observed.

Despite the fact that all the tested wells are located within settlements, and obviously subjected to intensive anthropogenic impact, we cannot exclude an additional contribution of a powerful natural factor – significant climate change in the deterioration of groundwater quality. The main role of the climatic factor in the formation of surface and groundwater qualitative composition causes a justified concern about the deterioration of their quality due to climate change. According to the data of meteorological observations, conducted in Ukraine since 1881, the average annual temperature increase over the last 30 years was 1.20 C, and the average annual temperature in Ukraine may rise by another 1–1.50 C during the next 30 years. Aridization of the climate is observed, which may lead to a significant shift of the physiographic zones' boundaries and desertification of large territories in the next 30-40 years. One of the negative consequences of climate change is predicted to be significant changes in the quantitative and qualitative groundwater status (Wilson et al., 2021).

Russian aggression has greatly exacerbated an already difficult situation. Throughout 2022–2023, much of Ukraine was contaminated with oil products, heavy metals, and various chemical elements and compounds that entered the environment as a result of industrial plants destruction. Military activity has been observed in areas of particularly hazardous facilities, including the largest in Europe South Ukraine Nuclear Power Plant, which has been occupied since March 2022. Intense fighting continues in the Lower Dnipro sub-basin. Surface water and soil are heavily contaminated over large areas,

which cannot but affect groundwater, and especially the uppermost aquifers, given their unprotected nature. In addition, warfare changes the recharge conditions of unconfined aquifers, especially in places of mass rocket fire, as a result of the formation of sinkholes, as well as soil compaction from the movement of heavy military equipment. These effects have yet to be evaluated after the war is over.

Conclusions

The waters of unconfined aquifers in the Dnipro River basin are characterized by a complex and heterogeneous chemical composition, which is caused by numerous natural and anthropogenic factors. As a result of comparing the different-time hydrogeological maps, long-term trends of pollutants concentrations increasing have been established. During the last four decades there has been a profound metamorphization of unconfined aquifers groundwater chemical composition in the Dnipro basin. Particularly significant changes have occurred within the Middle and Lower Dnipro sub-basins, where TDS has doubled, and the anionic composition in most wells has undergone radical changes.

The priority is to restore groundwater monitoring of unconfined aquifers, taking into account their relationship with surface ecosystems and underlying confined aquifers. Only on the basis of monitoring, necessarily including background areas least disturbed by anthropogenic impact, it will be possible to better understand the contribution of natural and anthropogenic factors in the process of groundwater quality deterioration.

And, above all, one of the important directions of post-war rehabilitation in Ukraine should be to change the water supply sources of the rural population and improve sanitary conditions in rural areas. It is necessary, as noted in the works of previous studies (Shestopalov et al., 2005), to develop and implement a program of rural water supply through the use of water from the second or third from the surface confined aquifers.

REFERENCES

- CIS WFD (2000/60/EC) Guidance document No. 15. Guidance on Groundwater Monitoring. 2007. https://circabc.europa.eu/sd/a/e409710d-f1c1-4672-9480-e2b9e93f30ad/Groundwater%20Monitoring%20Guidance%20Nov-2006_FINAL-2.pdf
- Goshovsky S., Sanina I., Lyuta N. 2019. Identification and delimitation of groundwater bodies in the Dnipro River basin, Ukraine. Final report. Kyiv. https://www.euwipluseast.eu/images/2019/04/GWB-Delineation-DNIPRO_UA_final.pdf (in Ukrainian).

- Lyuta N.G., Sanina I.V. 2022. Water quality problems of unconfined aquifers in the Dnipro basin. *Abstract of 16th International Scientific Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of Environment*. Kyiv, Ukraine. <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2022/11/Mon-22-175.pdf> (in Ukrainian).
- Lyutyi G.G., Lyuta N.G., Sanina I.V. 2021. Assessment of changes in groundwater quality of aquifers of the Dniprovsko-Donetskiy artesian basin. *Mineralni Resursy Ukrainy*, 3: 20–23. <https://doi.org/10.31996/mru.2021.3.20-23> (in Ukrainian).
- Nitrate and Methemoglobinemia. Minnesota Department of Health. [Electronic resource]. [Website]. 2018. Access mode: (<https://www.health.state.mn.us/communities/environment/water/docs/contaminants/nitratmethemog.pdf>) (access date 19 January 2023). Name from the screen.
- Migulya V.M., Tkachuk V.G., Pugach S.A. 1981. Methodical Recommendations for Preparation of Regional Maps of Natural Groundwater Protection in the UkrSSR in Scale 1:200,000. Dnepropetrovsk: IMR of the USSR, pp. 23–25 (in Russian).
- Osadchyi V.I., Nabyvanets B.Y., Osadcha N.M., Nabyvanets Y.B. 2008. Hydrochemical reference book. Kyiv: Nika Center (in Ukrainian).
- Sanina I.V., Lyuta N.G., Prykhodko S.M. 2005. Estimation of protective properties of rocks in the aeration zone using GIS. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDGRI*, 3: 115–120 (in Ukrainian).
- Shestopalov V., Lyalko V., Gudzenko V., Drobnohod M., Ognianyuk M., Rudenko Yu., Sytnykov A., Skalsky O., Suhorebryi A., Yakovlev Ye. 2005. Groundwater as strategic resource. *Visnyk NAN Ukrainy*, 5: 32–39 (in Ukrainian).
- State of groundwater. Yearbook. 2021. Kyiv: State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, State Information Geological Fund of Ukraine (in Ukrainian).
- Vyshnevskiy V.I., Kosovets O.O. 2003. Hydrological characteristics of the rivers of Ukraine. Kyiv: Nika-Center (in Ukrainian).
- Wilson L., New S., Daron J., Golding N. 2021. Climate Change Impacts for Ukraine. Met Office. Access mode: https://mepr.gov.ua/files/docs/Zmina_klimaty/2021/%D0%97%D0%B2%D1%96%D1%82.pdf (access date 19 January 2023). Name from the screen.

Received 12.02.2023

Received in revised form 14.04.2023

Accepted 30.05.2023

Просторово-часові особливості змін хімічного складу вод безнапірних водоносних горизонтів у четвертинних відкладах басейну Дніпра

Н.Г. Люта¹ *, І.В. Саніна²

¹ ННІ «Інститут геології», Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Україна

E-mail: nlyuta@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4070-0944>

² ВП Український геологорозвідувальний інститут, ДП «Українська геологічна компанія», Україна

E-mail: ekogeol@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6592-9625>

*Автор для кореспонденції

Проаналізовано та узагальнено дані про хімічний склад вод безнапірних водоносних горизонтів у басейні Дніпра. Це проведено не лише у зв'язку з необхідністю впровадження вимог методичних документів Водної Рамкової директиви ЄС у процесі моніторингу підземних вод, а передовсім через те, що ґрунтові води широко використовуються для водопостачання населення у сільських населених пунктах. Ґрунтові води відзначаються складним і неоднорідним хімічним складом, обумовленим комплексом природних і антропогенних чинників. На території басейну Дніпра яскраво виявляється природна гідрохімічна зональність. Низка хімічних елементів і сполук у воді містяться у концентраціях, що перевищують нормативи для питних вод, установлені ДСанПіН 2.2.4-171-10, у природному стані. Крім того, безнапірні водоносні горизонти зазнають суттєвого антропогенного впливу, оскільки є незахищеними від забруднення. Виконане порівняння даних щодо мінералізації та аніонного складу ґрунтових вод, отриманих під час гідрогеологічних робіт у період 1965–1975 і 2009–2013 рр. по трьох аркушах гідрогеологічної карти масштабу 1:200 000 у різних суббасейнах Дніпра, засвідчило повсюдні великі зміни хімічного складу ґрунтових вод. Крім значного антропогенного навантаження, ґрунтові води зазнають суттєвого впливу кліматичних чинників. За 40-річний період мінералізація на півночі басейну Дніпра зросла на 50 %, у центральній і південній частинах – удвічі, за рахунок збільшення вмісту сульфатів і хлоридів. У межах проаналізованих територій у суббасейнах Середнього і Нижнього Дніпра відзначається практично повсюдне нітратне забруднення ґрунтових вод. На значній території ґрунтові води через понаднормовий вміст хімічних елементів і сполук природного та антропогенного походження є непридатними для питного водопостачання населення. Тому одним з першочергових завдань повноцінної відбудови України повинне стати переведення сільського населення на водопостачання із захищених напірних водоносних горизонтів і поліпшення санітарних умов у сільських населених пунктах.

Ключові слова: підземні води; безнапірні водоносні горизонти; умови формування; якісний стан; мінералізація; басейн Дніпра.

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586>
УДК 502.5:(665.7:556.388)(477)

Оцінка впливу коливань рівня ґрунтових вод на трансформацію нафтопродуктового забруднення підземного середовища

О.М. Шпак*, Р.Б. Гаврилюк, О.І. Логвиненко, І.М. Запольський

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

E-mail: shpak_lena@yahoo.com; gavrilyuk.ruslan@gmail.com; lohvyenko.olha@gmail.com; igorzapol@gmail.com

* Автор для кореспонденції

Розглянуто актуальну проблему забруднення підземного середовища нафтопродуктами та його трансформації під впливом коливань рівнів ґрунтових вод. Проаналізовано світовий досвід дослідження впливу коливань рівнів ґрунтових вод на трансформацію нафтопродуктового забруднення, зокрема процеси перерозподілу мобільних нафтопродуктів, розчинення, випаровування та біодеградації вуглеводневих сполук, а також на різницю між дійсною потужністю шару мобільних нафтопродуктів у пористому середовищі та уявною потужністю нафтопродуктів у спостережній свердловині, що має важливе значення при плануванні ремедіаційних заходів.

Досліджено вплив коливань рівнів ґрунтових вод на трансформацію осередку нафтопродуктового забруднення підземного середовища на ділянці складу паливно-мастильних матеріалів аеропорту «Бориспіль». В результаті коливань рівня ґрунтових вод відбувались «розмазування» гасу в зоні аерації, що призвело до збільшення зони забруднення ґрунтів у вертикальному розрізі. Багаторічна амплітуда коливань рівня ґрунтових вод становить 2,4 м, зона забруднення ґрунтів нафтопродуктами також знаходиться в цих межах. Найбільша площа забруднення ґрунтових вод розчиненими нафтопродуктами спостерігалась при найнижчих рівнях ґрунтових вод. Найвищі концентрації розчинених нафтопродуктів (75,98 мг/дм³) зафіксовані в районі лінзи гасу. Поза лінзою гасу площинне поширення забруднення ґрунтових вод є обмеженим. Аналіз даних моніторингу свідчить про те, що на даний час забруднення підземного середовища нафтопродуктами на ділянці складу паливно-мастильних матеріалів аеропорту «Бориспіль» локалізовано, подальше його поширення не прогнозується. Рекомендовано проводити моніторинг процесів природного ослаблення осередку нафтопродуктового забруднення.

Ключові слова: підземне середовище; нафтопродукти; трансформація забруднення; коливання рівня ґрунтових вод.

Цитування: Шпак О.М., Гаврилюк Р.Б., Логвиненко О.І., Запольський І.М. Оцінка впливу коливань рівня ґрунтових вод на трансформацію нафтопродуктового забруднення підземного середовища. *Геологічний журнал*. 2023. № 2 (383). С. 40–57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586>

Citation: Shpak O.M., Havryliuk R.B., Lohvyenko O.I., Zapolskiy I.M. 2023. Assessment of the impact of groundwater table fluctuations on the transformation of subsurface contamination with petroleum products. *Geologichnij zhurnal*, 2: 40–57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NG-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

Актуальність дослідження. Протягом останніх 50 років стрімкий розвиток нафто-хімічної промисловості у всьому світі призвів до численних аварійних розливів та витоків нафтопродуктів (НП), що значно вплинуло на довготривалу якість підземних вод. НП (бензин, гас, дизельне паливо тощо) є одними з найпоширеніших забруднювачів ґрунтів та підземних вод. Потрапляючи у підземне середовище, НП перерозподіляються шляхом міграції через зону аерації (ЗА) та насичену зону (НЗ) і взаємодії з підземними водами. Окремі компоненти НП є токсичними, що впливає на рослини, мікроорганізми, тварин і здоров'я людей. Це робить підземні води непридатними як для сільського господарства, так і для питного водопостачання (Cavelan et al., 2021). Оскільки НП зазвичай є складними багатокомпонентними сумішами з різними фізико-хімічними властивостями, це значно ускладнює відновлення забруднених НП ділянок, яке може бути довготривалим і дорогим. Краще розуміння керуючих факторів процесів трансформації НП-забруднення та відновлення забруднених ділянок стало важливою науковою метою останніх десятиліть (McAlexander, Sihota, 2019; Alazaiza et al., 2020; Ismail et al., 2020; Cavelan et al., 2021).

З метою покращення поведінки з осередками НП-забруднення та обмеження впливу забруднення на довкілля необхідно враховувати вплив сезонних коливань рівнів ґрунтових вод (РГВ), режиму опадів і температури на поведінку НП (Cavelan et al., 2021, 2022). Численні лабораторні і польові дослідження та модельні експерименти продемонстрували, що сезонні або спричинені відкачкою коливання РГВ впливають на міграцію та перерозподіл НП у підземному середовищі (Lenhard et al., 2017, 2019), швидкість розчинення компонентів (Teramoto, Chang, 2017), випаровування (Guo et al., 2019; Qi et al., 2020) та біодеградацію (Dobson et al., 2007; Gupta et al., 2019; Ismail et al., 2020). Дослідження показали, що коливання РГВ та/або зміни вологості ґрунту впливають на вертикальну дисперсію та перерозподіл компонентів НП у капілярній каймі, посилюючи їх вивільнення в ґрунтові води та повітря. Коливання РГВ суттєво впливають на різницю між уявною товщиною шару НП у спостереж-

ній свердловині та дійсною товщиною шару НП у підземному середовищі. Це ускладнює оцінку дійсної товщини та обсягу НП, що необхідно враховувати при проектуванні вилучення НП (Atteia et al., 2019; Deska, Осієра, 2013; Lenhard et al., 2017).

В Україні, де тривалий час існують численні осередки НП-забруднення підземного середовища, дослідження в цьому напрямі мають важливе значення при плануванні ремедіаційних заходів.

Метою статті є огляд літературних джерел стосовно впливу коливань РГВ на трансформацію НП-забруднення підземного середовища та оцінки впливу коливань РГВ на трансформацію осередку НП-забруднення на ділянці складу паливно-мастильних матеріалів (ПММ) аеропорту «Бориспіль».

Теоретичне обґрунтування та аналіз останніх досліджень і публікацій

На міграцію та розподіл НП у ґрунтах та підземних водах впливають різні параметри, а саме об'єм витоку НП, фізико-хімічні властивості НП, характеристики ґрунту та амплітуда і швидкість коливань РГВ.

Після витоків у підземне середовище мобільні НП під впливом гравітації просочуються вниз крізь пори ґрунту (рис. 1). Під час міграції через ЗА значна частина НП може бути захоплена капілярними силами у вигляді залишкових крапель та ганглій або сорбована зернами ґрунту. Багато компонентів НП характеризуються високим тиском пари і можуть безпосередньо випаровуватися в ґрунтовий газ, утворюючи потенційно шкідливі викиди летких органічних компонентів – ЛОК (Patterson, Davis, 2009). Якщо в підземне середовище потрапляє достатній об'єм НП, мобільні НП досягають РГВ та накопичуються на ньому (див. рис. 1). Далі під впливом плавучості та відносної проникності мобільні НП поширюються латерально в напрямку потоку ґрунтових вод, утворюючи лінзи в капілярній каймі. Мобільні та залишкові НП є джерелом потрапляння розчинених вуглеводнів з інфільтраційним потоком у ґрунтові води, утворюючи шлейф розчинених компонентів НП (див. рис. 1). Якщо вміст компонентів НП у ґрунтових водах перевищує їх номінальну розчин-

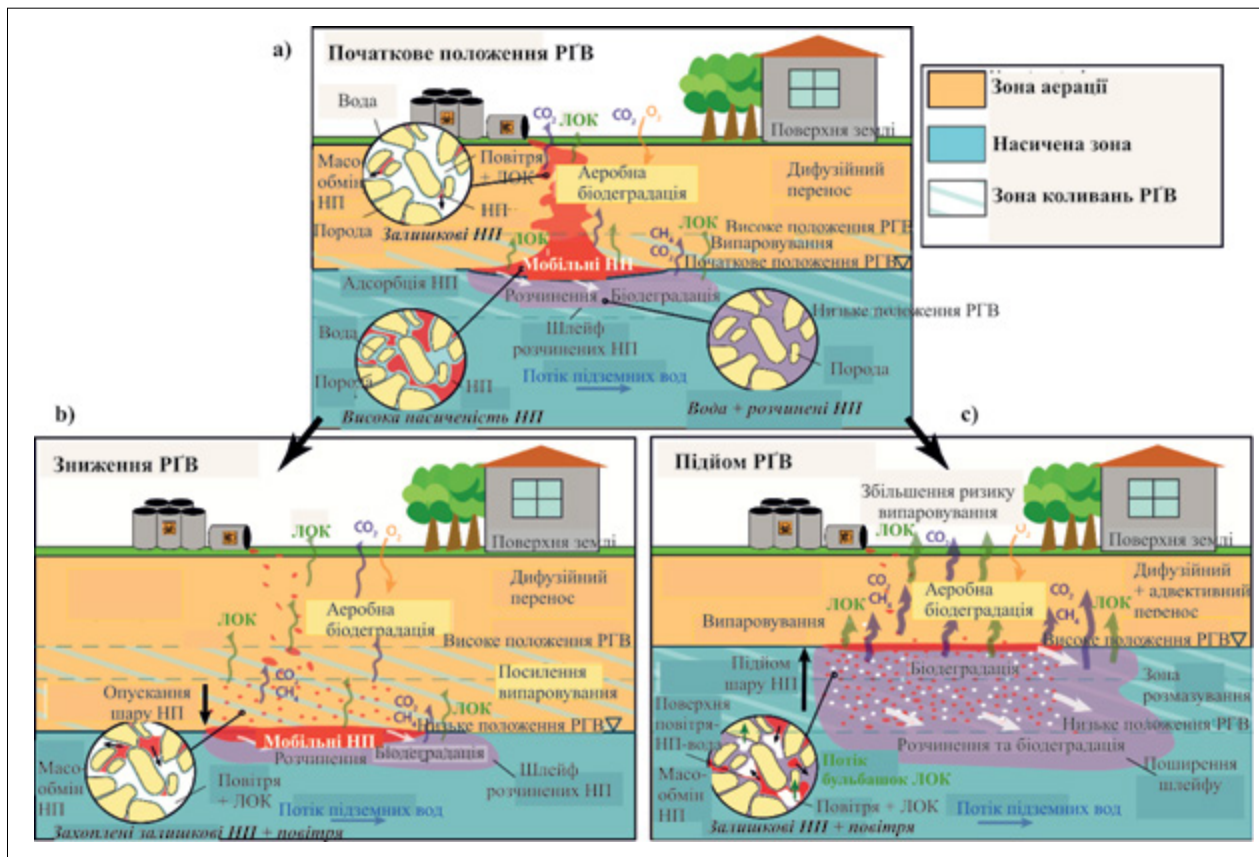


Рис. 1. Концептуальна модель трансформації НП-забруднення під час коливань РГВ: (а) початкове положення РГВ під час розливу НП; (б) зниження РГВ (сухий сезон); (с) підйом РГВ (вологий сезон) (Cavelan et al., 2021)

Fig. 1. Conceptual model showing LNAPL mobilization and transformation processes in a contaminated site during water table fluctuations: (a) initial water table level during the oil spill; (b) low water table level (dry season); (c) high water table level (wet season) (Cavelan et al., 2021)

ність, це можна сприймати як непряму ознаку наявності плівки або емульсії НП (Брикс та ін., 2015). Механічна дисперсія та дифузія в поєднанні з адвективним потоком ґрунтових вод призводять до поперечної міграції розчинених компонентів НП, збільшуючи ризики для об'єктів-реципієнтів (наприклад, джерел питного водопостачання), куди розвантажуються ґрунтові води. Прогнозування трансформації НП-забруднення підземного середовища у часі та відновлення забруднених ділянок є складною задачею (Newell et al., 1995; Lenhard et al., 2017).

Мікроорганізми ґрунту сприяють деградації компонентів НП. Мікробні популяції та процеси біодеградації вуглеводнів характеризуються різноманітністю та значно змінюються з глибиною залежно від окисно-відновних умов, доступності електронних акцепторів і складу НП (Garg et al., 2017; Шпак, Логвиненко, 2019; Sookhak Lari et al., 2019). Дослідження з визначення природи мікроорганізмів і механізмів,

що контролюють життєдіяльність бактерій, свідчать про значну роль біодеградації у природному ослабленні НП-забруднення (Rivett, Sweeney, 2019; Bruckberger et al., 2021).

В роботі (Cavelan et al., 2021) проаналізовано літературу переважно за останні два десятиліття, щоб покласти основу для розуміння динаміки процесів, які впливають на мобільність, розподіл та біодеградацію НП у підземному середовищі в контексті зміни клімату. Головним чином два фактори мають найбільший вплив на трансформацію НП-забруднення, а саме коливання РГВ і зміни температури. Більш глибоке розуміння ймовірних переходів у масштабах домінуючих процесів забезпечує основу для розробки стратегії поводження з осередками НП-забруднення та зменшення ризиків, пов'язаних із забрудненими НП ділянками.

У безнапірних водоносних горизонтах висота РГВ і капілярної кайми з часом може змінюватися з ряду причин. Такі кліматичні фактори,

як кількість опадів та зміна температурного режиму, призводять до зміни амплітуди коливань РГВ. У праці (Шевченко та ін., 2021) наведено дані про зміни циклічності РГВ, пов'язані з проявами глобального потепління, а в роботі (Шевченко та ін., 2019) йдеться про взаємоз'язок між зростанням температури теплового періоду, збільшенням випаровування та зниженням РГВ і підземного стоку, а також зменшенням живлення більш глибоких водоносних горизонтів та зниженням рівнів у них. Сезонні коливання РГВ відбуваються, коли живлення, поглинання рослинністю та забір підземних вод змінюються протягом року. Максимальні РГВ спостерігаються весною завдяки таненню снігу, зростанню рівня води в річках, частим опадам. Під час літньої посухи і відсутності дощів РГВ знижуються. В осінній період РГВ відновлюються через часті дощі (варто зазначити, що в Україні останні два десятиліття за осінній період РГВ відновлювались лише частково). Коливання РГВ можуть відбуватися протягом більш коротких періодів часу через зміни висоти водної поверхні у навколишніх водоймах та завдяки іншим метеорологічним і гідрофізичним чинникам. Зміни положення РГВ також можуть відбуватися впродовж більш тривалого періоду часу, якщо середні показники живлення перевищують середні показники відбору та природного розвантаження підземних вод, або навпаки. Також на положення РГВ впливають глобальні зміни клімату, що відображаються в багаторічних коливаннях – десяти і сторічних.

Колівання положення РГВ впливають на просторовий розподіл НП у водоносному горизонті. За умов «стаціонарного» РГВ процеси розчинення, випаровування та поперечна міграція розчинених компонентів НП є відносно обмеженими через малу вертикальну дисперсію та повільну дифузію розчинених компонентів НП (Gupta et al., 2019). Утримання і мобільність НП у насиченому пористому середовищі залежать від насиченості кожної фази (повітря, вода, НП) у ЗА. Ефект гістерезису, значною мірою викликаний коливаннями РГВ, часто виникає, оскільки мобільна фаза НП рухається вертикально разом із коливаннями РГВ (Gatsios et al., 2018). Насиченість мобільної фази НП є високою, а вода займає менші пори. Коли РГВ опускається,

мобільні НП одночасно рухаються вниз (див. рис. 1, *b*), що призводить до перерозподілу мобільних НП і зміни розподілу компонентів НП між різними фазами. Частина НП залишається в ЗА у вигляді переривчастих залишкових ганглій (Charbeneau, 2007). Найбільш леткі та розчинні сполуки НП можуть випаровуватися або вимиватися з інфільтраційними водами в ґрунтові водоносні горизонти та сприяти утворенню шлейфів розчинених вуглеводнів (Kechavarzi et al., 2005). Подальше підвищення РГВ (див. рис. 1, *c*) призводить до висхідного перерозподілу мобільних НП, при цьому окремі нерухомі захоплені краплі НП залишаються у НЗ (Charbeneau, 2007). Зону коливання РГВ і НП часто називають «зоною розмазування» (Cavelan et al., 2021). Під час послідовних фаз дренажу/вбирання вплив капілярного тиску, а також захоплення рідин у ЗА та НЗ постійно змінюють шляхи потоку води. Ці ефекти гістерезису, що супроводжуються додатковими взаємодіями НП–вода (ґрунтові та інфільтраційні води), сприяють мобілізації забруднень. Таким чином, сезонні або спричинені відкачкою коливання РГВ часто призводять до перерозподілу та поширення НП у зоні коливань РГВ (див. рис. 1), зменшення середньої насиченості НП та маси мобільних НП, що залишається після цього, та зниження дебіту вилучення НП (Newell, 1995; Charbeneau, 2007).

У відділі охорони підземних вод Інституту геологічних наук (ІГН) НАН України проведено лабораторні дослідження впливу коливань РГВ на стан і вміст НП у геологічному середовищі (Парамонова та ін., 2017а,б). Виконані експерименти показали, що при початковому підйомі і наступному опусканні РГВ товщина шару мобільного гасу зменшується (майже до повного зникнення). При підйомі РГВ зменшення потужності шару НП відбувається більш інтенсивно, через те що НП витрачається на створення нового шару з мобільним НП і нових капілярних зон, залишаючи після себе зацемлений водою НП. При зниженні РГВ товщина шару НП падає менш інтенсивно, оскільки шар НП витрачається на залишковий НП, який утримується ґрунтом після гравітаційного стікання. В роботі (Парамонова та ін., 2016) досліджено вплив коливання РГВ на формування залишкових та зацемлених НП.

Встановлено, що залишкова повнорідинна насиченість (вода+НП) і залишкові насиченості води та НП мають параболічну залежність від вихідних насиченостей води та НП при дренаванні із системи НП–вода. При природному підйомі РГВ НП (у даному випадку гас) не переноситься вище 10 см і заземляється в капілярній зоні; при первинному і наступних опусканнях РГВ після формування шару з мобільним НП залишкові насиченості води та НП будуть різними залежно від літологічного складу ґрунту, початкового насичення, інтервалу та часу опускання РГВ.

Утворення захоплених НП нижче РГВ призводить до зменшення мобільної фази НП у межах капілярної кайми. Це, ймовірно, зменшує міграцію мобільних НП до об'єктів-реципієнтів, розташованих нижче за потоком. Однак захоплення НП нижче РГВ збільшує вертикальну протяжність зони джерела (осередку) забруднення. Більше того, заземлення НП (у вигляді ізольованих крапель або гангліїв) збільшує площу розподілу НП–вода, тим самим сприяючи посиленому розчиненню НП. Це може збільшити розмір шлейфу розчинених вуглеводнів та швидкість біодеградації через зростання доступності поживних речовин та електронних акцепторів (Cavelan et al., 2021).

Зміни положення РГВ також впливають на випаровування НП та викиди ЛОК (Guo et al., 2019; Qi et al., 2020). Послідовність підйому та опускання РГВ призводить до скорочення або подовження шляхів транспортування випарів від шлейфу розчинених НП до поверхні (див. рис. 1) і посилює перенесення маси до шлейфу розчинених НП та газової фази ґрунту. Коли РГВ знижується, ґрунтові води, збагачені розчиненими компонентами НП, частково дренаються (див. рис. 1, *b*). Розчинені компоненти НП у поровій воді поступово піддаються впливу повітряної фази, сприяючи перенесенню ЛОК у парову фазу (Qi et al., 2020). Це збільшує ризики викидів ЛОК і проникнення випарів, особливо для неглибоких водоносних горизонтів.

На експериментальній станції GISFI (Номескорт, Франція) було досліджено вплив інтенсивності коливань РГВ та різних режимів опадів на стан забруднених дизелем ґрунтів. Результати моніторингу, який проводився протягом 120 днів, продемонстрували, що збіль-

шення інтенсивності коливань РГВ посилює розповсюдження та захоплення НП у порах ґрунту, сприяючи процесам випаровування НП і, отже, збільшуючи поверхневі викиди токсичних газів. Однак вплив на процеси розчинення НП у результаті вивільнення мобільних та залишкових НП під дією опадів та коливань РГВ був обмеженим або, принаймні, компенсувався біодеградацією значної частини НП, розчинених у ґрунтових водах (Cavelan et al., 2022).

Порівняння експериментів з умовами стаціонарного РГВ та РГВ, який зазнає коливань, показало, що послідовні підвищення та опускання РГВ і подальший розподіл компонентів НП сильно змінюють швидкість біодеградації НП (Gupta et al., 2019; Ismail et al., 2020; Van De Ven et al., 2021). Експерименти (Rainwater et al., 1993) продемонстрували, що у колонії, яка піддавалась циклічним коливанням рівня води (діапазон коливань становив 15 см кожні 48 годин), спостерігалось на 15 % менше залишкового забруднення паливом через 9 тижнів, ніж у колонії зі статичним рівнем води. Коливання РГВ також тимчасово впливають на вологість ґрунту, змінюючи швидкість дифузії кисню в ЗА, а отже, процеси аеробної біодеградації. Це впливає на здатність до біологічного розкладання органічних забруднювачів і вивільнення ЛОК у повітря (Gupta et al., 2019; Van De Ven et al., 2021). У більш загальному плані послідовні коливання РГВ посилюють дифузійну кисню (Gupta et al., 2019), оновлення мікроелементів у ґрунті і водній товщі шляхом адвективного перенесення (Rezanezhad et al., 2014), евакуацію побічних продуктів реакції, накопичених під час біодеградації, функціональну різноманітність і рухливість мікроорганізмів (Zhou et al., 2015). Це природним чином посилює біохімічну та мікробну динаміку, що призводить до більш високої швидкості біодеградації розчинених, захоплених і залишкових органічних забруднювачів (Rezanezhad et al., 2014). Лабораторні експерименти (Dobson et al., 2007) продемонстрували, що коливання РГВ призвели до захоплення НП та повітря нижче поверхні ґрунтового водоносного горизонту, збільшення вертикальної протяжності зони осередку НП-забруднення (у 6,7 раза), збільшення біодеградаційної активності та посилення вимивання розчинених компонентів НП (у 10–20 разів). Отже, можна очікувати,

що, незважаючи на підвищення біодеградації, коливання РГВ у водоносних горизонтах, забруднених НП, можуть призвести до збільшення ризику забруднення об'єктів-рецепієнтів, розташованих нижче за потоком.

Низка наукових праць присвячена дослідженню впливу коливань РГВ на товщину шару НП у спостережній свердловині (Charbeneau, 2007; Deska, Осієра, 2013; Lenhard et al., 2017; Atteia et al., 2019). З метою проектування ремедіації забрудненого НП підземного середовища необхідно оцінити обсяг мобільних НП, який можна визначити на основі товщини НП, вимірної в свердловинах, пробурених у кількох точках забрудненої ділянки (Charbeneau, 2007). Проте товщина шару НП, виміряна у спостережній свердловині (уявна товщина), завжди відрізняється від товщини шару НП у пористому середовищі (дійсна товщина) (Deska, Осієра, 2013). Ця різниця залежить від характеристик ґрунту, кількості та фізико-хімічних властивостей НП (US EPA, 1996). Додатковими факторами, що впливають на різницю між уявною та дійсною товщиною шару НП, є коливання РГВ та їх швидкість (Deska, Осієра, 2013). Під час коливань РГВ збільшується об'єм ґрунту, забрудненого НП, а отже, змінюється співвідношення між уявною та дійсною товщиною шару НП, що може призвести до неточної оцінки дійсної товщини НП у геологічному середовищі (Deska, Осієра, 2013).

Матеріали та методи

Еколого-геологічні дослідження, що проведені на забрудненій ділянці складу ПММ аеропорту «Бориспіль», включали моніторинг осередку НП-забруднення підземного середовища із замірами рівнів води та НП, відбір проб води та ґрунтів, оцінку об'єму і стану знаходження НП у ґрунті та їх трансформації під впливом коливань РГВ.

Моніторинг РГВ та рівнів НП виконано з різною періодичністю: у 2014 р. – кожного місяця, у 2015 та 2016 рр. – один раз на 3 місяці, протягом 2017–2018 рр. – два рази на рік, у 2019 р. – один раз на рік. Відбір проб ґрунтових вод здійснено у 2014 р. один раз на рік, у 2015–2016 рр. – тричі на рік, у 2017–2018 рр. – один раз на рік. Відбір проб води проведено за допомогою насоса Комовського.

Вміст розчинених НП у пробах води визначено ультрафіолет-спектрофотометричним методом із використанням автоматичного аналізатора «Мікран» (виробник ТОВ НВП «ЕКОНІКА», м. Одеса) у лабораторії відділу охорони підземних вод ІГН НАН України. Діапазон вимірювання аналізатора «Мікран» становить 0,01–900,0 мг/л. Границя сумарної відносної похибки $\delta = 20\%$ при довірчій ймовірності $P = 0,95$.

Інформація про місячні суми атмосферних опадів за даними метеостанції «Бориспіль» за період 1994–2020 рр. була надана Українським гідрометеорологічним інститутом.

Створена база даних (БД) об'єкта досліджень за допомогою застосування Rock Works на базі модуля СУБД MS Access (<https://www.rockware.com/product/rockworks/>). БД включає такі параметри, як абсолютні відмітки поверхні землі, літологія, стратиграфія, глибини залягання рівнів НП та РГВ, вміст НП у ґрунті та підземних водах, кількість опадів тощо у вигляді таблиць. Створена БД була використана для побудови еколого-гідрологічних розрізів, карт та графіків.

Об'єкт досліджень

Ділянка досліджень складу ПММ міжнародного аеропорту «Бориспіль» розташована на північній околиці м. Бориспіль (Київська область).

У геоморфологічному відношенні територія досліджень належить до другої надзаплавної тераси р. Дніпро Придніпровської рівнини та являє собою межиріччя р. Дніпро та його лівої притоки р. Трубіж. За характером рельєфу територія є слабохвилястою рівниною із загальним нахилом поверхні до долини р. Трубіж. Рельєф ділянки складу ПММ та прилягаючих територій, що зазнали впливу НП-забруднення, рівнинний з абсолютними відмітками висот 116–118 м.

Кліматичні умови території характеризуються м'якою зимою з частими відлигами і теплим літом. Середньорічна температура становить $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найбільш теплі місяці – липень-серпень, холодні – січень-лютий. Середньорічна кількість опадів коливається від 400 до 829 мм.

Верхня частина геологічного розрізу, до якої приурочено НП-забруднення, складена шаруватою товщею четвертинних осадових

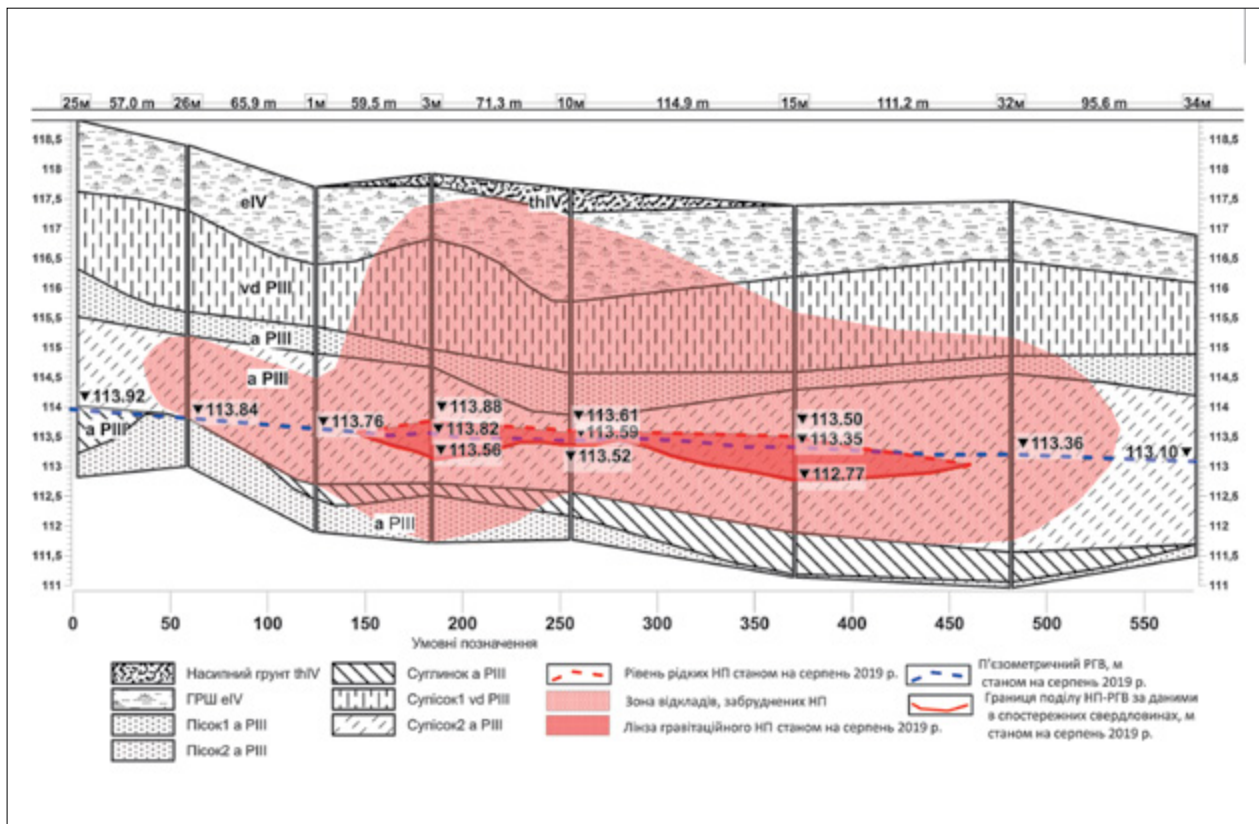


Рис. 2. Еколого-гідрогеологічний розріз ділянки складу ПММ аеропорту «Бориспіль» станом на серпень 2019 р.

Fig. 2. Ecological and hydrogeological section of the site of the warehouse of fuels and lubricants of the Boryspil airport as of August 2019

відкладів горизонтального залягання, стратиграфічно досить витриманих по простяганню (рис. 2).

Ґрунтово-рослинний шар представлений сучасними елювіальними відкладами (eIV) потужністю до 1,1 м. Підстеляється він верхньочетвертинними еолово-делювіальними відкладами (vdIII), складеними лесовидними палево-жовтими макропористими супісками потужністю 1–1,5 м. Нижче залягають алювіальні верхньочетвертинні відклади (aIII), верхня частина яких до глибини 5,5–6,0 м являє собою піщано-супіщано-суглинисту товщу. Верхня частина відкладів на більшій території представлена прошарком піску потужністю 0,3–0,5 м дрібнозернистого жовто-сірого, іноді бурого через озалізнення, найчастіше глинистого. Основний шар товщі – це супісок жовто-сірий, з піскуватими прошарками, з включенням карбонатів розміром до 2–3 см, місцями озалізнений, потужністю 1,5–3,0 м. У нижній частині товщі супісок замінюється

суглинком середнім, тугопластичним, темно-коричневим, озалізнений, потужністю 0,2–0,4 м. Описана товща підстиляється верхньочетвертинними алювіальними пісками другої надзаплавної тераси Дніпра (aIII), дрібнозернистими, жовто-сірими, в верхній частині глинистими, озалізненними, водонасиченими, які розповсюджені, ймовірно, до глибини 50 м.

Ґрунтовий водоносний горизонт вміщується в алювіальній піщано-супіщано-суглинистій товщі (aIII). Глибини залягання РГВ становлять від 1,5 до 4,2 м, рівневий режим тісно пов'язаний із режимом атмосферних опадів, унаслідок інфільтрації яких відбувається живлення горизонту. Зниження поверхні ґрунтових вод спостерігається в східному напрямку, із нахилом 0,0018 (рис. 3).

Завдяки неглибокому залягання водоносний горизонт широко використовується місцевим населенням та окремими підприємствами для побутового водопостачання за допомогою колодязів та свердловин.

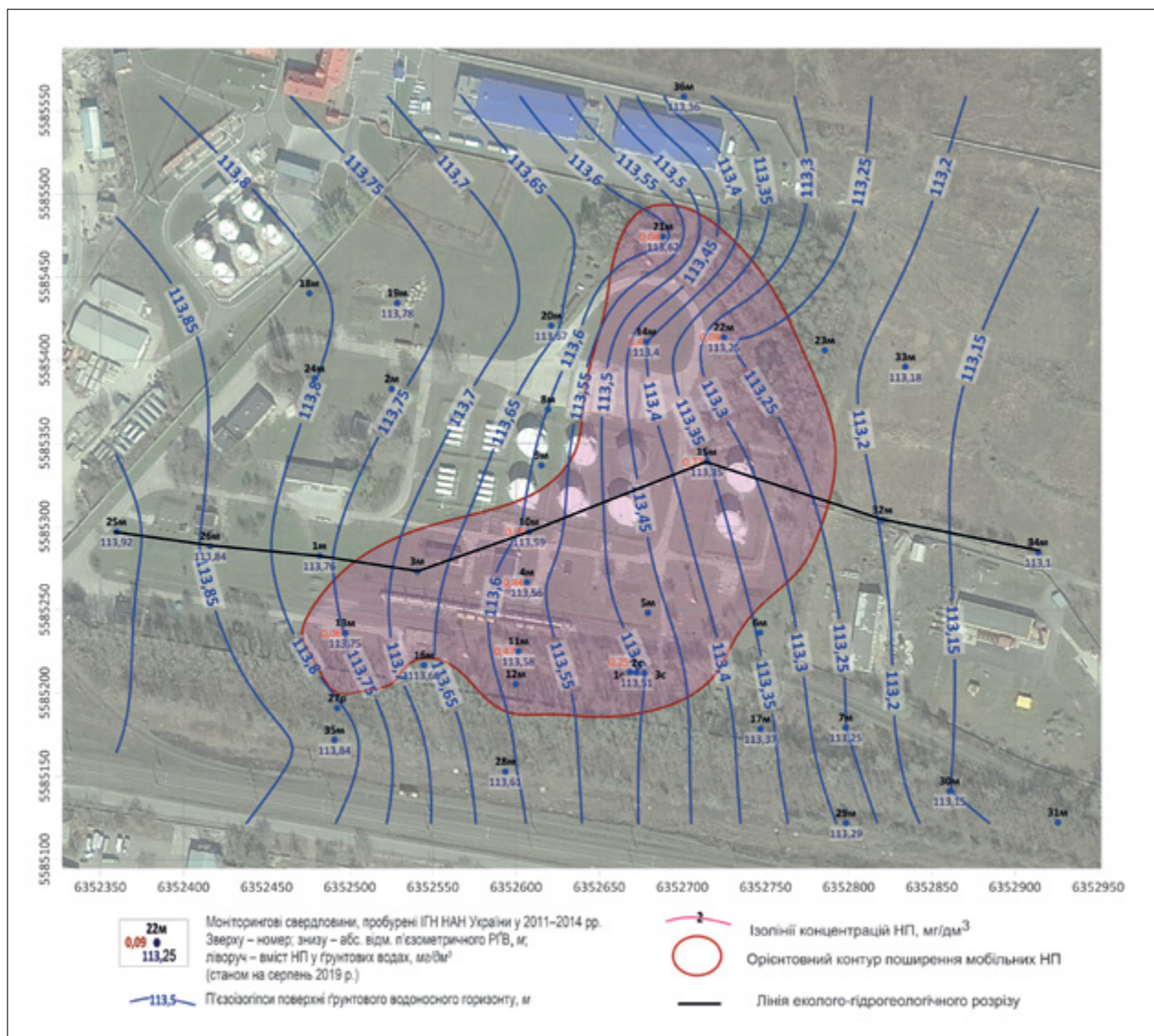


Рис. 3. Карта гідроізогіпс ґрунтового водоносного горизонту станом на серпень 2019 р.

Fig. 3. The map of groundwater contours as of August 2019

Дослідження впливу коливань РГВ на трансформацію осередку НП-забруднення на ділянці складу ПММ аеропорту «Бориспіль»

Історія досліджень. Забруднення підземного середовища НП у районі складу ПММ аеропорту «Бориспіль» у вигляді лінзи авіаційного ґасу вперше було виявлено у 1998 р. У результаті витоків НП відбувалось їх просочування в ЗА, представлену проникними лесовидними та алювіальними супісками і пісками, та подальша інфільтрація в напрямку ґрунтових вод. Потужність шару НП у свердловинах сягала 0,9 м,

сумарний об'єм НП, які накопичились на поверхні ґрунтових вод, становив 1725 м³ (Наукові..., 2015).

Протягом 1999–2000 рр. АП «Укрбудвишукування» та ТОВ «Еко-Плюс» було розроблено проект вилучення підземних вод, забруднених НП, для запобігання їх витоку за межі території складу ПММ аеропорту «Бориспіль» та закладено мережу ліквідаційних свердловин. Система відкачування водно-НП суміші, яка налічувала 42 свердловини (35 ліквідаційних (св. 1–35) та п'ять спостережних свердловин), експлуатується з 2001 р. У 2007 р. додатково було закладено сім ліквідаційних



Рис. 4. Схема розміщення моніторингових свердловин та поширення мобільних НП станом на листопад 2012 р.

Fig. 4. Scheme of monitoring well network and spreading of mobile petroleum products as of November 2012

свердловин (св. Н1–Н7) на ділянках максимального НП-забруднення підземного середовища.

У 2011 р. ІГН НАН України розпочато дослідження осередку НП-забруднення ділянки складу ПММ. Протягом 2011–2012 рр. пробурено моніторингові св. 1м–17м, які, за винятком св. 7м, розташовані в межах складу ПММ. Додатково для визначення зони впливу ліквідаційної свердловини пробурено промінь із трьох спостережних свердловин (св. 1с–3с). Станом на листопад 2012 р. було підтверджено наявність шару мобільних НП майже в усіх ліквідаційних свердловинах (рис. 4).

З метою оконтурення осередку забруднення в 2014 р. додатково було закладено 19 свердловин (св. 18м–26м, 27р, 28м–36м), що дозволило із достатньою точністю встановити межі поширення мобільних НП та забруднення ґрунтів, обладнати моніторингову мережу. За даними обстеження було встановлено значне збільшення площі забруднення – до 7,4 га. Причиною цього збільшення було зниження РГВ, що призвело до вивільнення защемленого газу в ґрунті (Наукові..., 2015).

В подальшому проведено моніторингові дослідження за наявністю шару мобільних НП, рівневого режиму лінзи авіаційного газу та

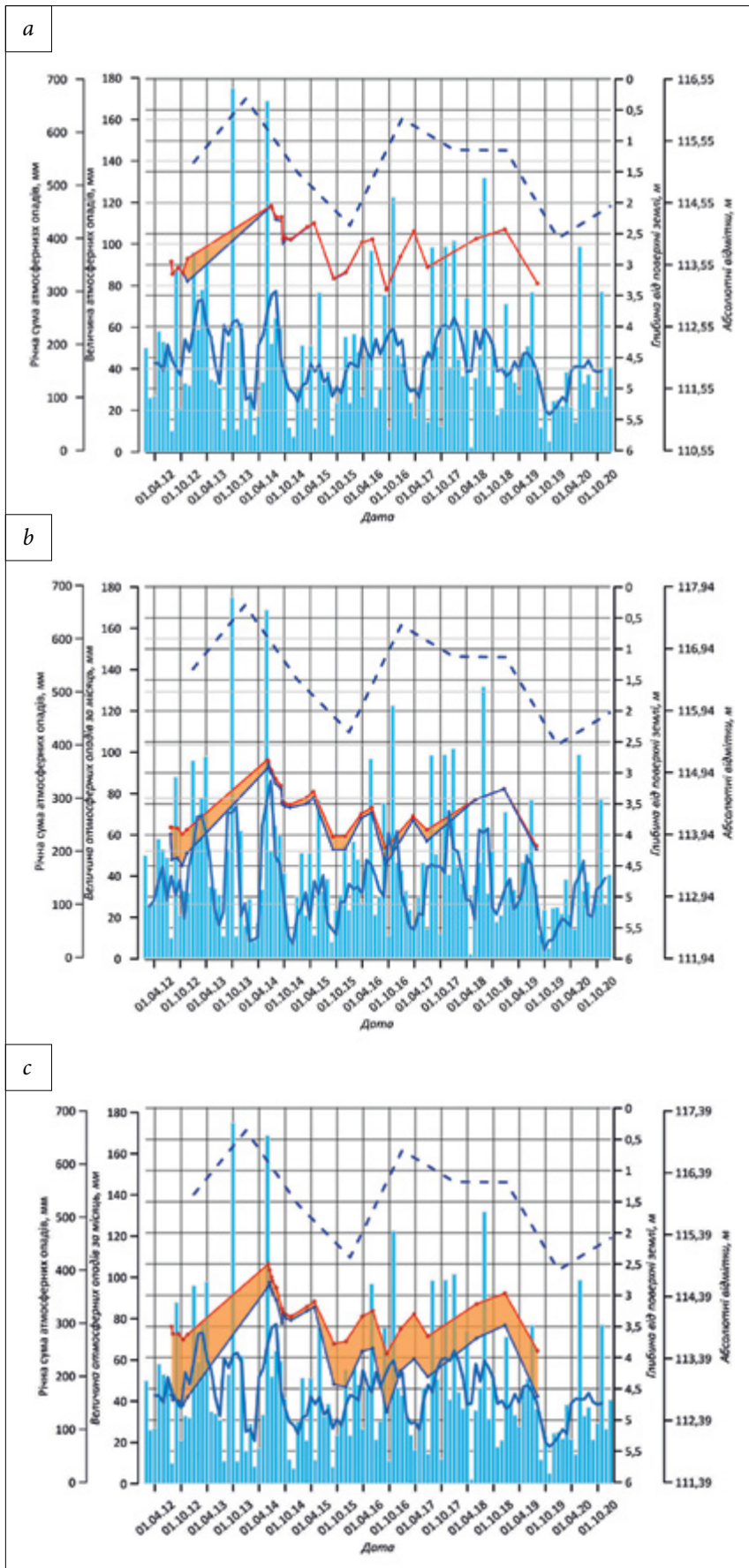


Рис. 5. Зміни товщини шару мобільних НП при зміні положення РГВ та кількості атмосферних опадів у свердловинах: а) св. 7; б) св. 13; в) св. 15

Fig. 5. Changes in the thickness of a mobile petroleum product layer due to groundwater table fluctuations and different atmospheric precipitation amount in the wells: a) well No. 7; b) well No. 13; c) well No. 15

грунтових вод, зміни хімічного складу ґрунтових вод у зв'язку із НП-забрудненням.

Ліквідаційні відкачки в зоні осередку забруднення виконано у період 2001–2019 рр. За час проведення ліквідаційних відкачок вилучено та очищено 35 267 м³ забрудненої води та 353,81 м³ мобільних НП. З 2019 р. ліквідаційні відкачки припинено в зв'язку з досягнутою мінімізацією загрози розповсюдження забруднення, оскільки максимально можливий об'єм НП було вилучено і застосований метод втратив ефективність (Шпак та ін., 2022). Потреби у ліквідаційних відкачках наразі не існує. Однак осередок НП-забруднення залишається, і хоча просування забруднення в горизонтальному плані не відбувається, але можливе збільшення зони забруднення по вертикалі (в розрізі) внаслідок зростання амплітуди коливань РГВ або його зниження.

Вплив коливань РГВ на зміну потужності шару НП у ґрунті та спостережній свердловині. Як було детально описано вище, в результаті коливань РГВ відбуваються процеси, що призводять до збільшення зони забруднення ґрунтів. Ці процеси дуже добре спостерігаються на дослідному об'єкті.

Шар мобільних НП у ґрунті було зафіксовано в усіх свердловинах протягом 2012 р. (рис. 5). У св. 13 та 15 шар мобільних НП спостерігався впродовж 2014–2017 рр. та у 2019 р. (див. рис. 5, *b, c*). З жовтня 2013 р. по жовтень 2014 р. в усіх свердловинах та у 2018 р. в окремих свердловинах (св. 7 і 13) НП переходив у защемлений стан у результаті підйому РГВ і практично був відсутній у спостережних свердловинах (див. рис. 5, *a, b*).

За період спостережень шар мобільного ґасу майже зникав при підйомах РГВ і частково відновлювався при зниженнях РГВ (див. рис. 5). При цьому відбувалось додаткове забруднення ЗА, оскільки при кожному підйомі РГВ та ґасу формувалась нова капілярна зона. Наприклад, у червні 2014 р. спостерігалось найбільше підняття РГВ за весь період спостережень, що призвело до значного зменшення товщини шару мобільного ґасу або його зникнення в спостережних свердловинах, тобто перехід ґасу в защемлений стан. З 11 вересня 2012 р. по 12 червня 2014 р. шар ґасу скоротився від 3 разів і більше. Наприклад, у св. 15 потужність шару ґасу зменшилась з 1,07 до 0,20 м, тобто в 5,35 раза

(див. рис. 5, *c*). При подальшому зниженні РГВ шар ґасу відновлювався, але не повною мірою. Найбільша його потужність спостерігалась у вересні 2016 р. при найбільш низьких РГВ за час спостережень і у св. 15м становила 0,93 м, або 83 % від максимальної потужності у 2012 р. Близько 13 % ґасу залишилися захопленими ґрунтом. Такі ж закономірності підтверджуються даними інших свердловин. Найбільші потужності мобільного ґасу спостерігались на відмітках 113–114,2 м; на цих глибинах, ймовірно, і формувався основний об'єм лінзи ґасу. При наступних підняттях РГВ потужності ґасу зменшувались.

За час спостережень багаторічна амплітуда коливань РГВ становила 2,4 м. Зона забруднення також знаходилась в цих межах. Шар вільного ґасу, що відновлювався, сягав 112,5–114,5 м. У результаті коливань РГВ відбувалось «розмазування» ґасу в ЗА і забруднення додаткового об'єму ґрунту. Починаючи з 2015 р. у зв'язку з поступовим зниженням РГВ шар ґасу частково відновлювався.

Вплив коливань РГВ на розчинення НП у ґрунтових водах. За час спостережень певних закономірностей в зміні концентрацій розчинених НП у ґрунтових водах не відзначено, але намітилися деякі тенденції. Найвищі концентрації розчинених НП зафіксовані в районі лінзи ґасу – максимальні значення до 75,98 мг/дм³. За межами лінзи ґасу поширення забруднення ґрунтових вод є досить обмеженим по площі із згасанням концентрацій розчинених НП. На відстані близько 100 м від межі поширення лінзи ґасу розчинені НП у воді не виявлені (рис. 6). Найменша відстань, на яку розповсюджується забруднення ґрунтових вод, простежується в південному напрямку, що може бути пов'язане з наявністю менш проникних ґрунтів і загальною спрямованістю ґрунтового потоку у східному напрямку. У вересні 2016 р. при найнижчих РГВ спостерігалась найбільша площа поширення розчинених НП (див. рис. 6).

Найвищі концентрації розчинених НП у воді були зафіксовані у березні 2015 р. при високих відмітках РГВ. У межах лінзи ґасу концентрації НП становили до 75,98 мг/дм³ (св. 12м), за її межами – до 6,99 мг/дм³ (св. 26м). Найнижчі концентрації НП зафіксовані у березні 2016 р. при зниженнях РГВ до 20,32 мг/дм³

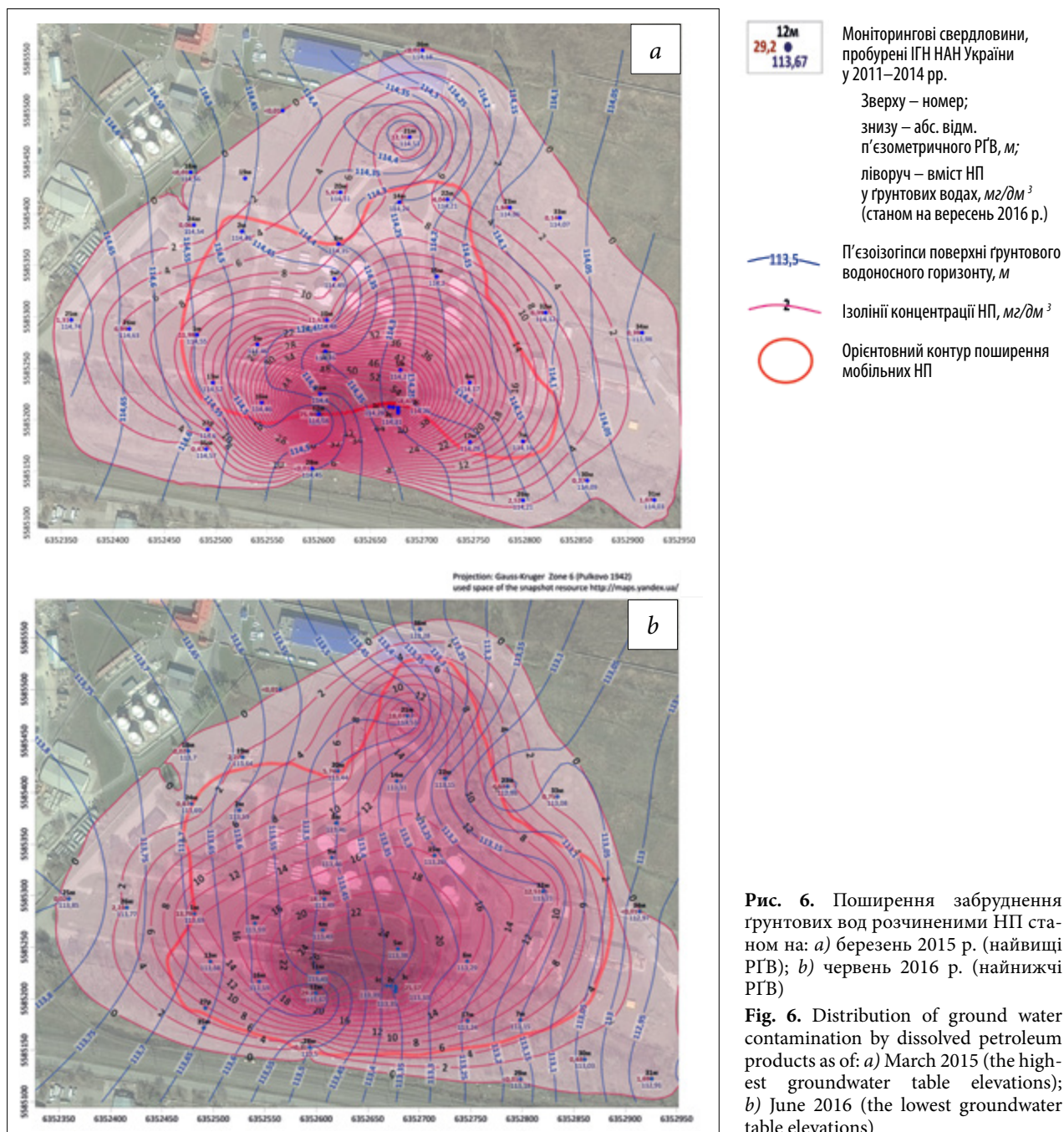


Рис. 6. Поширення забруднення ґрунтових вод розчиненими НП станом на: *a*) березень 2015 р. (найвищі РГВ); *b*) червень 2016 р. (найнижчі РГВ)

Fig. 6. Distribution of ground water contamination by dissolved petroleum products as of: *a*) March 2015 (the highest groundwater table elevations); *b*) June 2016 (the lowest groundwater table elevations)

у межах лінзи газу (св. 20м) і до 1,65 мг/дм³ за її межами (св. 26м). Станом на 2018 р. концентрації розчинених НП у межах лінзи газу становили до 46,51 мг/дм³ (св. 20м) і до 12,87 мг/дм³ (св. 26м) поза межами лінзи.

У деяких свердловинах (св. 31м, 34м) простежується залежність збільшення концентрацій розчинених НП у ґрунтових водах від підйому РГВ (рис. 7). У св. 20м, 21м, 23м, 30м та 33м спостерігається протилежна закономірність – з підняттям РГВ концентрації розчине-

них НП зменшуються (див. рис. 7). Але для більшості свердловин певної закономірності не простежується. За період спостережень площа забруднених розчиненими НП ґрунтових вод не змінилась. Ймовірно, це пов'язано з сорбційними властивостями ґрунтів.

Аналіз даних моніторингу дозволяє припустити, що забруднення, в його сучасних масштабах, локалізовано і подальшого його поширення не відбудеться за умови виключення нових втрат і надходжень НП у підземне середовище.

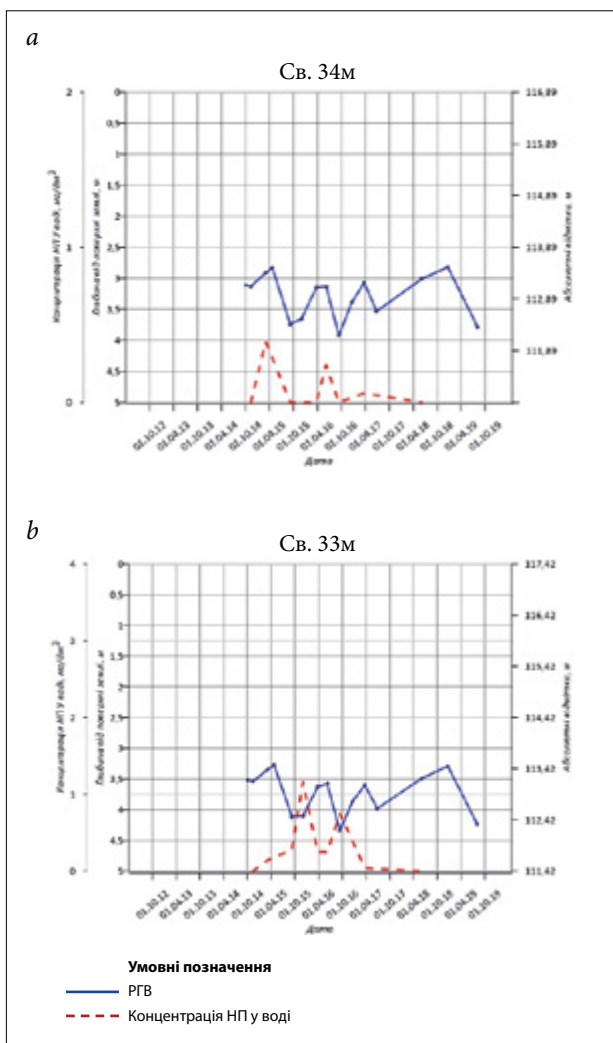


Рис. 7. Залежність концентрацій розчинених НП від коливань РГВ у св. 34м та 33м

Fig. 7. The relationship between dissolved hydrocarbon concentrations and water table fluctuations in wells No. 34m and No. 33m

Процеси, що відбуваються в межах осередку залишкового НП-забруднення, можна віднести до природного самоочищення, однак для уточнення цього твердження варто в подальшому проводити регулярний моніторинг з відбором проб ґрунту і води та визначенням вмісту НП у них.

Висновки

Аналіз сучасного стану досліджень щодо впливу кліматичних факторів на трансформацію НП-забруднення підземного середовища свідчить про те, що коливання РГВ суттєво впливають на процеси перерозподілу мобільних НП,

розчинення, випаровування та біодеградацію вуглеводнів, сприяючи поширенню НП-забруднення та збільшенню ризику забруднення об'єктів-рецепієнтів. Коливання РГВ також впливають на різницю між уявною товщиною шару НП у спостережній свердловині та дійсною товщиною шару НП у підземному середовищі. Це ускладнює оцінку дійсної товщини та обсягу НП, що необхідно враховувати при проектуванні вилучення НП.

Оцінено вплив коливань РГВ на трансформацію осередку НП-забруднення на ділянці складу ПММ аеропорту «Бориспіль». В результаті коливань РГВ відбувались процеси, які призводили до збільшення зони забруднення ґрунтів. У період спостережень шар мобільного гасу майже зникав при підйомах РГВ і відновлювався при їх зниженні. При цьому відбувалось додаткове забруднення ЗА, оскільки при кожному підйомі РГВ та гасу формувалась нова капілярна зона. Практично у всіх спостережних свердловинах шар мобільного гасу був зафіксований протягом 2012 р., а потім до 2014 р. у результаті підйому РГВ зникав, переходячи у защемлений стан. Починаючи з 2015 р. у зв'язку з поступовим зниженням РГВ шар мобільного гасу частково відновлювався в окремих свердловинах. Багаторічна амплітуда коливань РГВ становила 2,4 м, зона НП-забруднення підземного середовища також знаходилась у цих межах. Таким чином, у результаті коливань РГВ відбувалось «розмазування» гасу в ЗА і забруднення додаткового об'єму ґрунту.

За час спостережень найбільші концентрації розчинених НП у ґрунтових водах (до 75,98 мг/дм³) зафіксовані в районі лінзи гасу. За межами лінзи гасу поширення забруднення ґрунтових вод є незначним – на відстані близько 100 м від лінзи гасу розчинені НП у воді не виявлені. У вересні 2016 р. при найбільш низьких РГВ спостерігалась найбільша площа забруднення ґрунтових вод розчиненими НП. Найвищі концентрації розчинених НП у воді були відмічені у березні 2015 р. при високих відмітках РГВ: у межах лінзи гасу концентрації НП становили до 75,98 мг/дм³, за її межами – до 6,99 мг/дм³. Найнижчі концентрації НП зафіксовані у березні 2016 р. при зниженні РГВ до 20,32 мг/дм³ у межах лінзи гасу і до 1,65 мг/дм³ за її межами.

Аналіз даних моніторингу осередку НП-забруднення на ділянці складу ПММ аеропорту «Бориспіль» дозволяє припустити, що на даний час НП-забруднення підземного середовища локалізовано і подальшого його поширення не відбудеться за умови виключення нових втрат і надходжень НП у підземне середовище. В подальшому варто проводити

регулярний моніторинг процесів природного ослаблення осередку НП-забруднення.

В роботі висвітлено результати досліджень, профінансованих за бюджетною програмою «Геологічні дослідження для пом'якшення та адаптації до зміни клімату в Україні» (КПКВК 6541230-2).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Брикс А.Л., Гаврилюк Р.Б. Трансформація скупчень легких нафтопродуктів, забруднюючих геологічне середовище. *Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Сер. Геологія, географія, екологія*. 2015. № 1157. С. 116–123.
- Наукові основи ліквідації забруднення геологічного середовища легкими нафтопродуктами. Звіт про науково-дослідну роботу, № держреєстрації 0115U005445. Київ: ІГН НАН України, 2020. 224 с.
- Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И. Лабораторные исследования влияния колебания уровня грунтовых вод на состояние и содержание легких нефтепродуктов в геологической среде. Ст. 1. Проведение опыта с первоначальным подъемом уровня грунтовых вод после формирования слоя с легким нефтепродуктом. *Геол. журн.* 2017а. № 3 (360). С. 42–54.
- Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И. Лабораторные исследования влияния колебания уровня грунтовых вод на состояние и содержание легких нефтепродуктов в геологической среде. Ст. 2. Опыт с первоначальным опусканием напора воды после формирования слоя с мобильным керосином. *Геол. журн.* 2017б. № 4 (361). С. 77–87.
- Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И., Негода Ю.О. Влияние колебания уровня грунтовых вод на формирование остаточных и защемленных легких нефтепродуктов. *Геол. журн.* 2016. № 1 (354). С. 112–124.
- Шевченко О.Л., Скорбун А.Д., Чарний Д.В. Підпорядкованість коливань рівнів ґрунтових вод в басейні р. Південний Буг кліматичним змінам. *Вісн. Одес. нац. ун-ту. Сер. Географічні та геологічні науки*. 2021. Т. 26, вип. 2 (39). С. 175–194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202)
- Шевченко А.Л., Осадчий В.И., Чарний Д.В. Изменения режима, баланса и ресурсов подземных вод Полесья и лесостепи Украины под влиянием глобального потепления. *Вучонья записки Бреськага універсітета*. 2019. Вып. 15, ч. 2. С. 117–128.
- Шпак О.М., Гаврилюк Р.Б., Логвиненко О.И. Оцінка ефективності ремедіації геологічного середовища на території складу паливно-мастильних матеріалів аеропорту «Бориспіль». *Вісн. Київ. нац. ун-ту. Сер. Геологія*. 2022. № 1 (96). С. 76–82.
- Шпак Е.Н., Логвиненко О.И. Исследование природного самоочищения подземной среды, загрязненной нефтепродуктами. *Мінер. ресурси України*. 2019. № 3. С. 49–51.
- Alazaiza M.Y.D., Ramli M.H., Coptu N.K., Sheng T.J., Aburas M.M. LNAPL saturation distribution under the influence of water table fluctuations using simplified image analysis method. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2020. Iss. 79. P. 1543–1554. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01655-3>
- Atteia O., Palmier C., Schafer G. On the influence of groundwater table fluctuations on oil thickness in a well related to an LNAPL contaminated aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2019. Vol. 223. 103476. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772219300014>
- Bruckberger M.C., Gleeson D.B., Bastow T.P., Morgan M.J., Walsh T., Rayner J.L., Davis G.B., Puzon G.J. Unravelling Microbial Communities Associated with Different Light Non-Aqueous Phase Liquid Types Undergoing Natural Source Zone Depletion Processes at a Legacy Petroleum Site. *Water*. 2021. Iss. 13 (7). 898.
- Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Davarzani H., Deparis J., Faure P. A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change. *Science of the Total Environment*. 2021. 806. 150412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150412>
- Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Oltean C. How climate change could affect our contaminated soils and groundwater tables: example of light petroleum contaminants (LNAPLs). 2022. https://www.researchgate.net/publication/365225085_How_climate_change_could_affect_our_contaminated_soils_and_groundwater_tables_example_of_light_petroleum_contaminants_LNAPLs
- Charbeneau R. LNAPL Distribution and Recovery Model. Vol. 1: Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media. 2007. API Publication 4760. https://www.api.org/-/media/files/ehs/clean_water/ground_water_quality/lnapl/4760-v1.pdf
- Deska I., Ociepa E. Impact of the water table fluctuations on the apparent thickness of light non-aqueous phase liquids. *Ecol. Chem. Eng.* 2013. A. 20 (7–8). P. 771–778. DOI: 10.2428/ecea.2013.20(07)070

- Dobson R., Schroth M.H., Zeyer J. Effect of water-table fluctuation on dissolution and biodegradation of a multi-component, light nonaqueous-phase liquid. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2007. Vol. 94, iss. 3–4. P. 235–248.
- Garg S., Newell C.J., Kulkarni P.R., King D.C., Adamson D.T., Renno M.I., Sale T. Overview of natural source zone depletion: Processes, controlling factors, and composition change. *Groundwater monitoring & remediation*. 2017. Vol. 37, iss. 3. P. 62–81. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12219>
- Gatsios E., García-Rincón J., Rayner J.L., McLaughlan R.G., Davis G.B. LNAPL transmissivity as a remediation metric in complex sites under water table fluctuations. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 215. P. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.026>
- Guo Y., Holton C., Luo H., Dahlen P., Johnson P.C. Influence of Fluctuating Groundwater Table on Volatile Organic Chemical Emission Flux at a Dissolved Chlorinated Solvent Plume Site. *Groundwater Monitoring & Remediation*. 2019. Vol. 39. P. 43–52.
- Gupta G.P.K., Yadav B., Yadav B.K. Assessment of LNAPL in subsurface under fluctuating groundwater table using 2D sand tank experiments. *Journal of Environmental Engineering*. 2019. Vol. 145. 04019048. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001560).
<https://www.rockware.com/product/rockworks/>
- Ismail R., Shafieiyoun S., Al-Raoush R.I. Influence of water table fluctuation on natural source zone depletion in hydrocarbon contaminated subsurface environments. *Proceedings of the International Conference on Civil Infrastructure and Construction (CIC 684 2020)*. Presented at The International Conference on Civil Infrastructure and Construction, Qatar University Press. 2020. P. 654–658. <https://doi.org/10.29117/cic.2020.0084>
- Kechavarzi C., Soga K., Illangasekare T.H. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2005. Vol. 76. P. 211–233. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2004.09.001>
- Lenhard R.J., Rayner J.L., Davis G.B. A practical tool for estimating subsurface LNAPL distributions and transmissivity using current and historical fluid levels in groundwater wells: Effects of entrapped and residual LNAPL. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2017. Vol. 205. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.06.002>
- Lenhard R.J., Rayner J.L., García-Rincón J. Testing an analytical model for predicting subsurface LNAPL distributions from current and historic fluid levels in Monitoring Wells: A preliminary test considering hysteresis. *Water*. 2019. Vol. 11. 2404.
- McAlexander B., Sihota N. Influence of Ambient Temperature, Precipitation, and Groundwater Level on Natural Source Zone Depletion Rates at a Large Semiarid LNAPL Site. *Groundwater Monitoring & Remediation*. 2019. Vol. 39. P. 54–65. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12309>
- Newell C.J. Light Nonaqueous Phase Liquids. *United States Environmental Protection Agency*. Office of Research and Development, [and] Office of Solid Waste and Emergency Response. 1995.
- Patterson B.M., Davis G.B. Quantification of vapor intrusion pathways into a slab-on-ground building under varying environmental conditions. *Environmental science & technology*. 2009. Vol. 43. P. 650–656.
- Qi S., Luo J., O'Connor D., Cao X., Hou D. Influence of groundwater table fluctuation on the non-equilibrium transport of volatile organic contaminants in the vadose zone. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 580. 124353. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124353>
- Rainwater K., Mayfield M.P., Heintz C., Claborn B.J. Enhanced in situ Biodegradation of Diesel Fuel by Cyclic Vertical Water Table Movement: Preliminary Studies. *Water Environment Research*. 1993. Vol. 65. P. 717–725.
- Rezanezhad F., Couture R.M., Kovac R., O'Connell D., Van Cappellen P. Water table fluctuations and soil biogeochemistry: An experimental approach using an automated soil column system. *Journal of Hydrology*. 2014. Vol. 509. P. 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.036>
- Rivett M., Sweeney R. An introduction to natural source zone depletion at LNAPL sites (technical bulletin). University of Strathclyde, Glasgow. 2019.
- Sookhak Lari K., Davis G.B., Rayner J.L., Bastow T.P., Puzon G.J. Natural source zone depletion of LNAPL: A critical review supporting modelling approaches. *Water research*. 2019. Vol. 157. P. 630–646.
- Teramoto E.H., Chang H.K. Field data and numerical simulation of btx concentration trends under water table fluctuations: Example of a jet fuel-contaminated site in Brazil. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2017. Vol. 198. P. 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.01.002>
- USEPA. How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites: A guide for state regulators. EPA 510-R-96-001.1996.
- Van de Ven C.J., Scully K.H., Frame M.A., Sihota N.J., Mayer K.U. Impacts of water table fluctuations on actual and perceived natural source zone depletion rates. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2021. Vol. 238. 103771.
- Zhou A., Zhang Y., Dong T., Lin X., Su X. Response of the microbial community to seasonal groundwater level fluctuations in petroleum hydrocarbon-contaminated groundwater. *Environ Sci. Pollut Res*. 2015. Vol. 22. P. 10094–10106. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4183-6>

Надійшла до редакції 06.02.2023

Надійшла у ревізованій формі 23.04.2023

Прийнята 05.05.2023

REFERENCES

- Alazaiza M.Y.D., Ramli M.H., Coptly N.K., Sheng T.J., Aburas M.M. 2020. LNAPL saturation distribution under the influence of water table fluctuations using simplified image analysis method. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 79: 1543–1554. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01655-3>
- Atteia O., Palmier C., Schafer G. 2019. On the influence of groundwater table fluctuations on oil thickness in a well related to an LNAPL contaminated aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 223: 103476. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772219300014>
- Bricks A.L., Havryliuk R.B. 2015. Transformation of light petroleum product accumulations contaminating the geological environment. *Bulletin of Karazin Kharkiv National University. Series: "Geology, geography, ecology"*, 1157: 116–123 (in Ukrainian).
- Bruckberger M.C., Gleeson D.B., Bastow T.P., Morgan M.J., Walsh T., Rayner J.L., Davis G.B., Puzon G.J. 2021. Unravelling Microbial Communities Associated with Different Light Non-Aqueous Phase Liquid Types Undergoing Natural Source Zone Depletion Processes at a Legacy Petroleum Site. *Water*, 13(7): 898.
- Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Davarzani H., Deparis J., Faure P. 2021. A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change. *Science of the Total Environment*, 806: 150412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150412>
- Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Oltean C. 2022. How climate change could affect our contaminated soils and groundwater tables: example of light petroleum contaminants (LNAPLs). https://www.researchgate.net/publication/365225085_How_climate_change_could_affect_our_contaminated_soils_and_groundwater_tables_example_of_light_petrolium_contaminants_LNAPLs
- Charbeneau R. 2007. LNAPL Distribution and Recovery Model. Volume 1: Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media. *API Publication*, 4760. https://www.api.org/-/media/files/ehs/clean_water/ground_water_quality/lnapl/4760-v1.pdf
- Deska I., Ociepa E. 2013. Impact of the water table fluctuations on the apparent thickness of light non-aqueous phase liquids. *Ecol. Chem. Eng. A*. 20 (7–8): 771–778. DOI: 10.2428/ecea.2013.20(07)070
- Dobson R., Schroth M.H., Zeyer J. 2007. Effect of water-table fluctuation on dissolution and biodegradation of a multi-component, light nonaqueous-phase liquid. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94, 3–4: 235–248.
- Garg S., Newell C.J., Kulkarni P.R., King D.C., Adamson D.T., Renno M.L., Sale T. 2017. Overview of natural source zone depletion: Processes, controlling factors, and composition change. *Groundwater monitoring & remediation*, 37: 62–81. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12219>
- Gatsios E., García-Rincón J., Rayner J.L., Mc Laughlan R.G., Davis G.B. 2018. LNAPL transmissivity as a remediation metric in complex sites under water table fluctuations. *Journal of Environmental Management*, 215: 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.026>
- Guo Y., Holton C., Luo H., Dahlen P., Johnson P.C. 2019. Influence of Fluctuating Groundwater Table on Volatile Organic Chemical Emission Flux at a Dissolved Chlorinated-Solvent Plume Site. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 39: 43–52.
- Gupta G.P.K., Yadav B., Yadav B.K. 2019. Assessment of LNAPL in subsurface under fluctuating groundwater table using 2D sand tank experiments. *Journal of Environmental Engineering*, 145: 04019048. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001560)
<https://www.rockware.com/product/rockworks/>
- Ismail R., Shafieiyoun S., Al-Raoush R.I. 2020. Influence of water table fluctuation on natural source zone depletion in hydrocarbon contaminated subsurface environments, in: *Proceedings of the International Conference on Civil Infrastructure and Construction (CIC 684 2020)*. Presented at the The International Conference on Civil Infrastructure and Construction, Qatar University Press. 654–658. <https://doi.org/10.29117/cic.2020.0084>
<https://doi.org/10.29117/cic.2020.0084>
- Kechavarzi C., Soga K., Illangasekare T.H. 2005. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, 76: 211–233. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2004.09.001>
- Lenhard R.J., Rayner J.L., Davis G.B. 2017. A practical tool for estimating subsurface LNAPL distributions and transmissivity using current and historical fluid levels in groundwater wells: Effects of entrapped and residual LNAPL. *Journal of Contaminant Hydrology*, 205: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.06.002>
- Lenhard R.J., Rayner J.L., García-Rincón J. 2019. Testing an analytical model for predicting subsurface LNAPL distributions from current and historic fluid levels in Monitoring Wells: A preliminary test considering hysteresis. *Water*, 11: 2404.
- McAlexander B., Sihota N. 2019. Influence of Ambient Temperature, Precipitation, and Groundwater Level on Natural Source Zone Depletion Rates at a Large Semiarid LNAPL Site. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 39: 54–65. <https://doi.org/10.1111/gwmr.12309>
- Newell C.J. 1995. Light Nonaqueous Phase Liquids. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, [and] Office of Solid Waste and Emergency Response.

- Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolsky I.N., Logvinenko O.I. 2017b. Laboratory studies of the influence of groundwater table fluctuations on the state and content of light petroleum products in the subsurface. Article. 2. Experience with the initial lowering of the water pressure after the formation of a layer with mobile kerosene. *Geologičnij žurnal*, 4 (361): 77–87 (in Russian).
- Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolsky I.N., Logvinenko O.I., Negoda Yu.O. 2016. The influence of groundwater table fluctuations on the formation of residual and entrapped light petroleum products. *Geologičnij žurnal*, 1 (354): 112–124 (in Russian).
- Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolsky I.N., Logvinenko O.I. 2017a. Laboratory studies of the influence of groundwater table fluctuations on the state and content of light petroleum products in the subsurface. Article. 1. Conducting an experiment with the initial rise in the groundwater level after the formation of a layer with a light oil product. *Geologičnij žurnal*, 3 (360): 42–54 (in Russian).
- Patterson B.M., Davis G.B. 2009. Quantification of vapor intrusion pathways into a slab-on-ground building under varying environmental conditions. *Environmental science & technology*, 43: 650–656.
- Qi S., Luo J., O'Connor D., Cao X., Hou D. 2020. Influence of groundwater table fluctuation on the non-equilibrium transport of volatile organic contaminants in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 580: 124353. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124353>
- Rainwater K., Mayfield M.P., Heintz C., Claborn B.J. 1993. Enhanced in situ Biodegradation of Diesel Fuel by Cyclic Vertical Water Table Movement: Preliminary Studies. *Water Environment Research*, 65: 717–725.
- Rezanezhad F., Couture R.M., Kovac R., O'Connell D., Van Cappellen P. 2014. Water table fluctuations and soil biogeochemistry: An experimental approach using an automated soil column system. *Journal of Hydrology*, 509: 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.036>
- Rivett M., Sweeney R. 2019. An introduction to natural source zone depletion at LNAPL sites (technical bulletin). University of Strathclyde, Glasgow.
- Scientific foundations of elimination of pollution of the geological environment by light petroleum products. 2020. Report on research work, State registration number 0115U005445. Kyiv: IGS of NAN of Ukraine (in Ukrainian).
- Shevchenko A.L., Osadchii V.I., Charny D.V. 2019. Changes in the regime, balance and resources of groundwater of Polissya and the forest-steppe zone of Ukraine under the influence of global warming. *Academic Notes of Brest Universitetay*. 2019, iss. 15, part 2: 117–128 (in Russian).
- Shevchenko O.L., Skoribun A.D., Charny D.V. 2021. Subordination of groundwater level fluctuations in the Southern Bug river basin to climatic changes. *Bulletin of Odessa National University. Series: Geographical and geological sciences*, 26, 2 (39): 175–194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202) (in Ukrainian).
- Shpak E.N., Logvinenko O.I. 2019. Research of natural remediation of the subsurface contaminated with petroleum products. *Mineral resources of Ukraine*, 3: 49–51 (in Russian).
- Shpak O.M., Havrilyuk R.B., Logvinenko O.I. 2022. Efficiency assessment of remediation actions in the site of subsurface contamination with petroleum products within the fuel and lubricants warehouse of Boryspil airport. *Bulletin of the Kyiv National University. Ser. Geology*, 1 (96): 76–82 (in Ukrainian).
- Sookhak Lari K., Davis G.B., Rayner J.L., Bastow T.P., Puzon G.J. 2019. Natural source zone depletion of LNAPL: A critical review supporting modelling approaches. *Water research*, 157: 630–646.
- Teramoto E.H., Chang H.K. 2017. Field data and numerical simulation of btx concentration trends under water table fluctuations: Example of a jet fuel-contaminated site in Brazil. *Journal of Contaminant Hydrology*, 198: 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.01.002>
- USEPA. 1996. How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites: A guide for state regulators. EPA 510-R-96-001.
- Van de Ven C.J., Scully K.H., Frame M.A., Sihota N.J., Mayer K.U. 2021. Impacts of water table fluctuations on actual and perceived natural source zone depletion rates. *Journal of Contaminant Hydrology*, 238: 103771.
- Zhou A., Zhang Y., Dong T., Lin X., Su X. 2015. Response of the microbial community to seasonal groundwater level fluctuations in petroleum hydrocarbon-contaminated groundwater. *Environ Sci. Pollut Res.*, 22: 10094–10106.

Received 06.02.2023

Received in revised form 23.04.2023

Accepted 05.05.2023

Assessment of the impact of groundwater table fluctuations on the transformation of subsurface contamination with petroleum products

O.M. Shpak, R.B. Havryliuk, O.I. Lohvynenko, I.M. Zapolskiy*

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: shpak_lena@yahoo.com; gavriyuk.ruslan@gmail.com; lohvynenko.olha@gmail.com; igorzapol@gmail.com

*Corresponding author

This paper describes the actual problem of groundwater contamination with petroleum products and its transformation under the influence of climatic factors. The global experience of studying the influence of groundwater table fluctuations on the transformation of petroleum contamination, in particular, the processes of redistribution of mobile petroleum products, dissolution, evaporation, and biodegradation of hydrocarbon compounds, as well as the difference between the actual thickness of a mobile petroleum product layer in porous media and the apparent thickness of a mobile petroleum product layer in a monitoring well was analyzed, which is important to plan remedial actions.

The impact of groundwater table fluctuations on transformation of the petroleum contamination source within the warehouse of fuels and lubricants of the Boryspil airport was studied. As a result of groundwater table fluctuations, kerosene was "smeared" in the vadose zone, which led to an increase in the soil contamination area. During the observation period, a mobile kerosene layer almost disappeared when a groundwater table rose and restored when a groundwater table decreased, while the vadose zone was additionally contaminated since a new capillary zone was formed during each rise of a groundwater table and kerosene. The long-term amplitude of groundwater table fluctuations was 2.4 m, and a petroleum contamination zone was also within these limits. During the observation period, the largest area of groundwater contamination with dissolved petroleum products was observed at the lowest groundwater table elevations in 2016. The highest concentration of dissolved hydrocarbons in groundwater (75.98 mg/dm³) was found within a mobile kerosene lens. Beyond the mobile kerosene lens, spreading of groundwater contamination with dissolved hydrocarbons is limited.

The analysis of the monitoring data of the petroleum contamination source within the warehouse of fuels and lubricants of the Boryspil airport indicates that at present subsurface contamination with petroleum products is localized, and its further spreading is not expected. It is recommended to continue in the future monitoring of the natural attenuation of subsurface contamination.

Keywords: *subsurface; petroleum products; contamination transformation; groundwater level fluctuations.*

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.275044>
UDC 550.4 (477); 551.21:551.24

***Tymkivia primitiva* gen. nov. sp. nov., a new type of fossils from the Late Ediacaran (Vendian) Kanylivka Group in Podolia, Ukraine**

A.I. Martyshyn

Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
E-mail: podolimirus@gmail.com

Tymkivia primitiva gen. nov. sp. nov. is described from Late Ediacaran shallow-water marine rocks of the Podolia region of Ukraine. The fossils are casts of the inner surface and imprints on the surface of bacterial mats (“death masks”) of small, sedentary sac-like organisms. Numerous imprints on the surface of mudstone and siltstone slabs testify to the existence of mass settlements of these organisms in the Volyn-Podilsky sedimentary basin in the Late Ediacaran. Morphological details that could be interpreted as a mouth, anus, and internal organs are not found in the fossils. *Tymkivia* was found in association with bacterial mat remains, and the carbonaceous compressions of *Vendotaenia*, *Kanilovia*, and the problematic rod-shaped *Harlaniella*. *Tymkivia* is interpreted as possible remains of benthic plants; it is morphologically similar to some modern green algae. The option of interpretation as a fossil record of the polyp stage of Medusozoa (Cnidaria) cannot be ruled out either. The appearance and disappearance of these organisms are the benchmarks of the stage of sedimentation of the Kanylivka Group.

Keywords: Ediacaran; Vendian; taphonomy; Podolia; green algae.

Citation: Martyshyn A.I. 2023. *Tymkivia primitiva* gen. nov. sp. nov., a new type of fossils from the Late Ediacaran (Vendian) Kanylivka Group in Podolia, Ukraine. *Geologičnij žurnal*, 2 (383): 58–67. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.275044>

Цитування: Мартишин А.І. *Tymkivia primitiva* gen. nov. sp. nov. – новий вид скам’янілостей з відкладів канилівської серії пізнього едіакарію (венду) Поділля, Україна. *Геологічний журнал*. 2023. № 2 (383). С. 58–67. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.275044>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NG-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Introduction

Fossils of bag-shaped organisms are quite rare in the Late Ediacaran sedimentary rocks of the Podolia (Podolia) region. An exception is the mass accumulation of possible cnidarian *Nemiana simplex* Palij, 1976, which usually show plastic deformation of their originally spherical bodies. *Vaveliksia velikanovi* Fedonkin, 1983 is characterized by a sac-shaped morphology; it was found in the deposits of the Lomoziv (Lomozov) Member of the Mohyliv (Mogilev) Formation of the Mogilev-Podolsky Group (Velikanov et al., 1983). Information about such records is scarce in publications from other regions with Ediacaran rocks. The bag-like fossil *Vaveliksia vana* Serezhnikova, 2004 is known from the Yorginskya Formation at the coast of the White Sea (Ivantsov et al., 2004). This species was interpreted as the likely ancestor of the Porifera based on the presence of spicule-like elements on the surface of their bodies. *Vaveliksia velikanovi* is known in the deposits of the Mogilev-Podolsky Group in Podolia (Nesterovsky et al., 2018). This discovery made it possible to compare *Tymkivia* gen. nov. and *Vaveliksia* and recognize important differences between them.

Accumulations of small bag-like fossils were discovered in the deposits of the Late Ediacaran Kanilovka Group (Kanilovskaya Series in the Russian-language literature) during fieldwork in 2015. Dozens of similar fossils were collected in outcrops along the Dniester River and its left tributaries in subsequent field seasons. Poor knowledge of the deposits of the Kanilovka Group, atypical morphology, and the small size of most of the fossil remains were the reasons why the material did not attract the attention of previous researchers. The new fossils show a significant range of morphological variation due to taphonomic factors.

Geological situation

The study area is located on the Podilskyi ledge on the southwestern slope of the Ukrainian crystalline shield. This region was a continental slope in the Late Precambrian (Velikanov et al., 1983). At the base of the sediments of the basin, there are crystalline rocks of the Paleoproterozoic: granites, migmatites, and their weathering products. The basement rocks are divided by numerous vertical faults into tectonic blocks with different ampli-

tudes of subsidence and uplift. On the surface of the blocks, which were raised close to the water surface, there were favorable conditions for the development of biotic communities of Ediacaran organisms. A thick layer of clastic rocks accumulated in the basin during the slow subsidence of the continental slope during the Ediacaran and early Cambrian times (Velikanov et al., 1983). Clastic rocks of different facies lie with a slight slope (1–2°) in the southwest direction (Gozhik, 2013).

The Ediacaran sedimentary succession in Podolia was studied in detail during the 1960s and 1970s; a detailed stratigraphic scheme of the deposits has been compiled and stratotype sections have been described (Korenchuk, Ishchenko, 1980; Velikanov et al., 1983). Subdivisions of the stratigraphic scale was based on lithological and paleontological features. Ediacaran rocks are accessible for study in outcrops along the Dniester River (Fig. 1). A part of the Volyn Group (Early Ediacaran), the complete section of the Mogilev-Podolsky and Kanilovka groups (Late Ediacaran), the transitional Okunets Formation and the Khmelnytsky Formation (Early Cambrian) are exposed in surface outcrops (Fig. 2). The Middle Ordovician, Early Silurian, Cretaceous, and Neogene carbonate sequences overlie these deposits. Kanilovka Group rocks overlie the deposits of the Mogilev-Podolsky Group with an unconformity. This sequence cuts off the more ancient levels of the Ediacaran up to



Fig. 1. Regional scheme of the research area. Outcrops of Ediacaran rocks:

1 – Vinozh, 2 – Popelyukhy Ravine, 3 – Bandashivka, 4 – Novodnistrovsk quarry, 5 – Bernashivka, 6 – Mohyliv-Podilskyi, Borshchiv Ravine, 7 – Lypchany, 8 – Tymkiv, 9 – Berezivka, 10 – Gorayivka, 11 – Kytaygorod

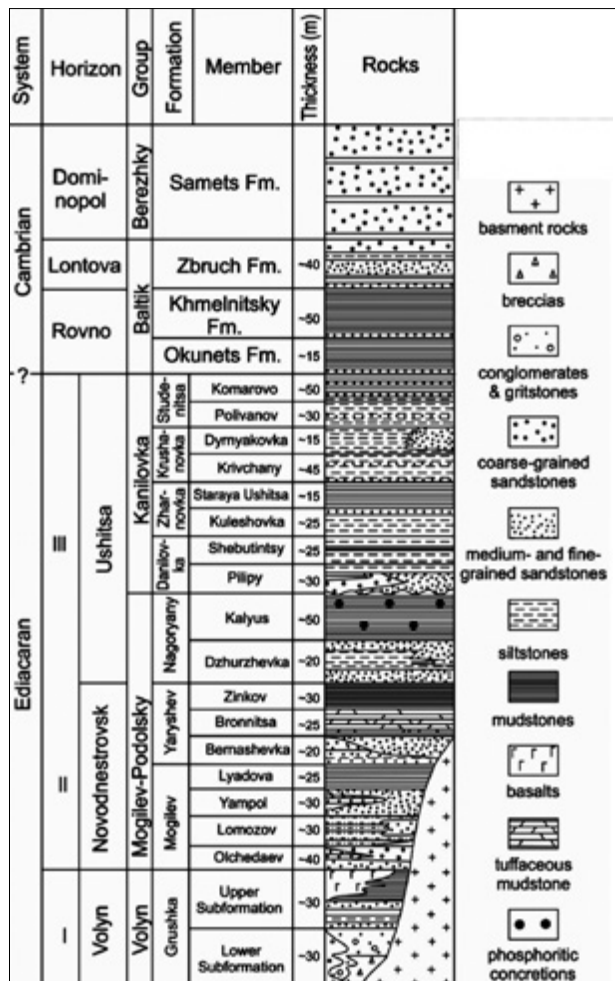


Fig. 2. Stratigraphic scheme of Upper Ediacaran deposits of Podolia

the Volyn Group in the direction from the Dokanilovskiy trough to the Galician geosynclinal trough (Gozhik, 2013). The Kaniilovka Group includes four sedimentation rhythms. Each of these rhythms has a basal sandstone part and predominantly mudstone-siltstone interbedding higher in the section (Korenchuk, Ishchenko, 1980). These rhythms served as the basis for the identification of stratigraphic units, which were named the Danilovka, Zharnovka, Krushanovka, and Studenitsa formations (see Fig. 2). The constituent elements of these rhythms were identified as Members (Velikanov et al., 1983).

Outcrop description

Fossils of *Tymkivia primitiva* gen. nov. sp. nov. were collected from outcrops of the Danilovka and Studenitsa formations near the villages of

Tymkiv, Kytaygorod, Berezhivka, Khrebtiviv and Buchaya (Khmelnitskiy region) (see Fig. 1). The fossil site near the village of Tymkiv is located on the western outskirts of the village in an inactive quarry on the right slope of the Ushitsya River. Dark gray bituminous mudstones of the Kalyus Member are exposed in the lower part of the quarry (Fig. 3, A). The weathering crust sustained along the strike is recognized at the upper boundary of these mudstones. This layer of half a meter thickness is a loose claystone. The boundary with the Pilipy Member sandstones, a member of the Kaniilovka Group, is sharp. Erosion patterns are imprinted on the lower surface of the sandstone. Bag-like fossils were collected in the basal layer of sandstones of the Pilipy Member and in the overlying layers. Above the basal layer lies a sequence of siltstones and mudstones with separate interbeds and lenses of fine-grained sandstones. The problematic rod-shaped fossil *Harlaniella podolica* Sokolov, 1972, a representative of the Namibian type biota *Rangea schneiderhoehni* Gurich, 1930, a member of the dickinsoniid group *Epibaion axiferus* Ivantsov, 2002, ring-shaped fossils of *Nimbia* cf. *occlusa* Fedonkin, 1980, spherical *Beltanelloides* sp., imprints of thalli of *Arumberia banksii* Glaessner & Walter, 1975, algal phytoleims *Vendotaenia antiqua* Gnilovskaya, 1971 and *Kaniilovia insolita* Istcenko, 1983, trace fossils of *Didymaulichnus* cf. *miettensis* Young, 1972 form a biotic association with *Tymkivia primitiva* at a locality near the village of Tymkiv (Glaessner, Walter, 1975; Ivantsov, Malakhovskaya, 2002; Nesterovsky et al., 2018).

The outcrop near the village of Kytaygorod has been studied by many researchers (Korenchuk, Ishchenko, 1980; Velikanov et al., 1983 and references therein; Martyshyn, Uchman, 2021). The abandoned quarry is located on the left slope of the Ternava River near the bridge (see Fig. 3, B). The upper part of the Komarovo Member of the Studenitsa Formation is composed of intercalation of mudstones and siltstones. These deposits are overlain by mudstones of the transitional Okunets Formation and a mudstone-siltstone-sandstone succession of the Early Cambrian Khmelnitskiy Formation (see Fig. 2). The ichnofossils *Treptichnus pedum* Seilacher, 1955 and numerous traces of burrowing organisms occur in the section at the boundary between the Okunets and Khmelnitskiy formations (Seilacher, 1955; Nesterovsky et al., 2018).

The lower base of the distribution of ichnofossils is a centimeter layer of glauconite, which is the conspicuous horizon in the section. According to the author of this work, this level can be considered the boundary between the Ediacaran and Cambrian systems. Fossils of *Tymkivia* were found in the middle part of the lower ledge of the quarry in the mudstone of the Komarovo Member. Remains of several morphotypes of *Harlaniella*, carbonaceous compression fossils of *Vendotaenia*, *Tyrasotaenia*, and imprints of the problematic *Palaeopascichnus delicatus* Paliy, 1976 have been collected from this outcrop in the Komarovo Member rocks (Paliy, 1976; Nesterovsky et al., 2018). One specimen of the probable ancestor of chordates (Tunicata) *Burykhia* sp. was discovered here at approximately the same level as *Tymkivia* (Martyshyn, Uchman, 2021). The geographic coordinates of the location

where the holotype of *Tymkivia primitiva* was found are 48°63'84" N, and 26°78'21" E (see Fig. 3).

The outcrop near the village of Berezivka, Khmelnytsky region, is located at the mouth of the Danylivka River at its confluence with the Dniester River (see Fig. 1). Mass accumulations of *Tymkivia* fossils were found in the basal layers of the Pilipy Member siltstones. Imprints of *Arumberia banksii* and undescribed bilateral trace fossils constitute the biotic association of the basal sequence here. Fossils of *Arumberia* are represented by several morphotypes and are probably the remains of algae (Kumar, Pandey, 2008; McMahon et al., 2022).

Materials

The fossils described here were collected during fieldwork between 2015 and 2022. The author has collected more than 30 fossil slabs in varying degrees of preservation. This work uses seven slabs that illustrate different fossil preservation types. The high densities of aggregations and the wide range of fossil preservation do not allow an accurate count of individuals. The specimens of the described taxon are stored in the collection of the T. Shevchenko Kyiv National University, Monographic Collection No. 26.

Systematic description

FAMILY INCERTAE SEDIS

Genus *Tymkivia* gen. nov.

Etymology. From the village of Tymkiv, Khmelnytskyi region, where the first specimen was found.

Type species: *Tymkivia primitiva* sp. nov.

Diagnosis. Soft-bodied, sac-like organism less than a centimeter in size. The imprint of the organism's body is elongated-oval, wider at the upper end and narrower towards the lower end. The lower end is conical or conically rounded, the upper end is spherical. The organism's length exceeds the maximum width by 2.5–3 times.

Species composition: The genus is monotypic.

Comparison. The new genus is partially similar to the rather rare *Vaveliksia* Fedonkin, 1983, but differs by several times smaller size and morphology of the attachment structure (the attachment is a conical "anchor" in *Tymkivia* in contrast to a voluminous disk in *Vaveliksia*).

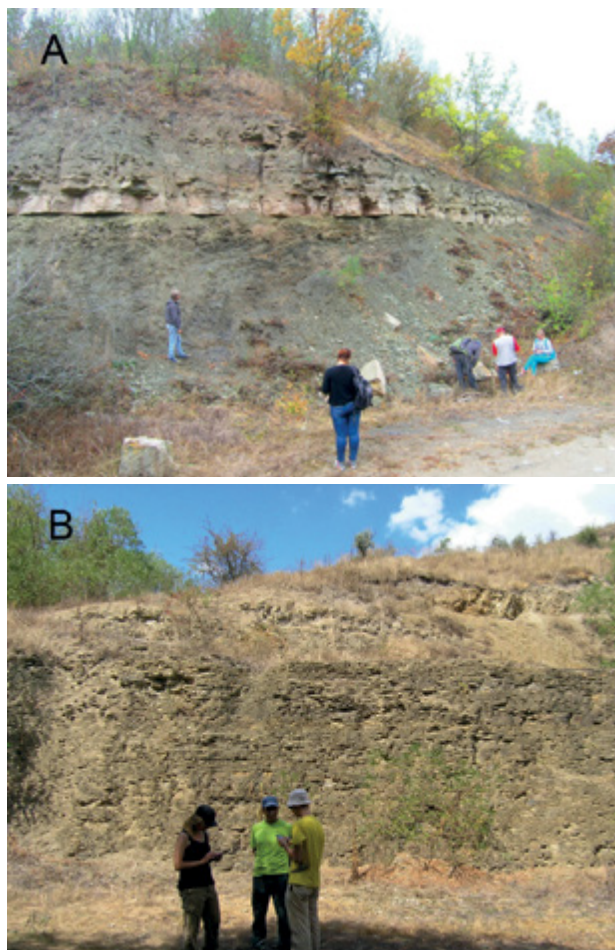


Fig. 3. Outcrops of Late Ediacaran section on which research was conducted:

A – outcrop of the boundary of deposits of Nagoryany and Danilovka formations near Tymkiv village; B – outcrop of the uppermost part of the Late Ediacaran near Kitaygorod village

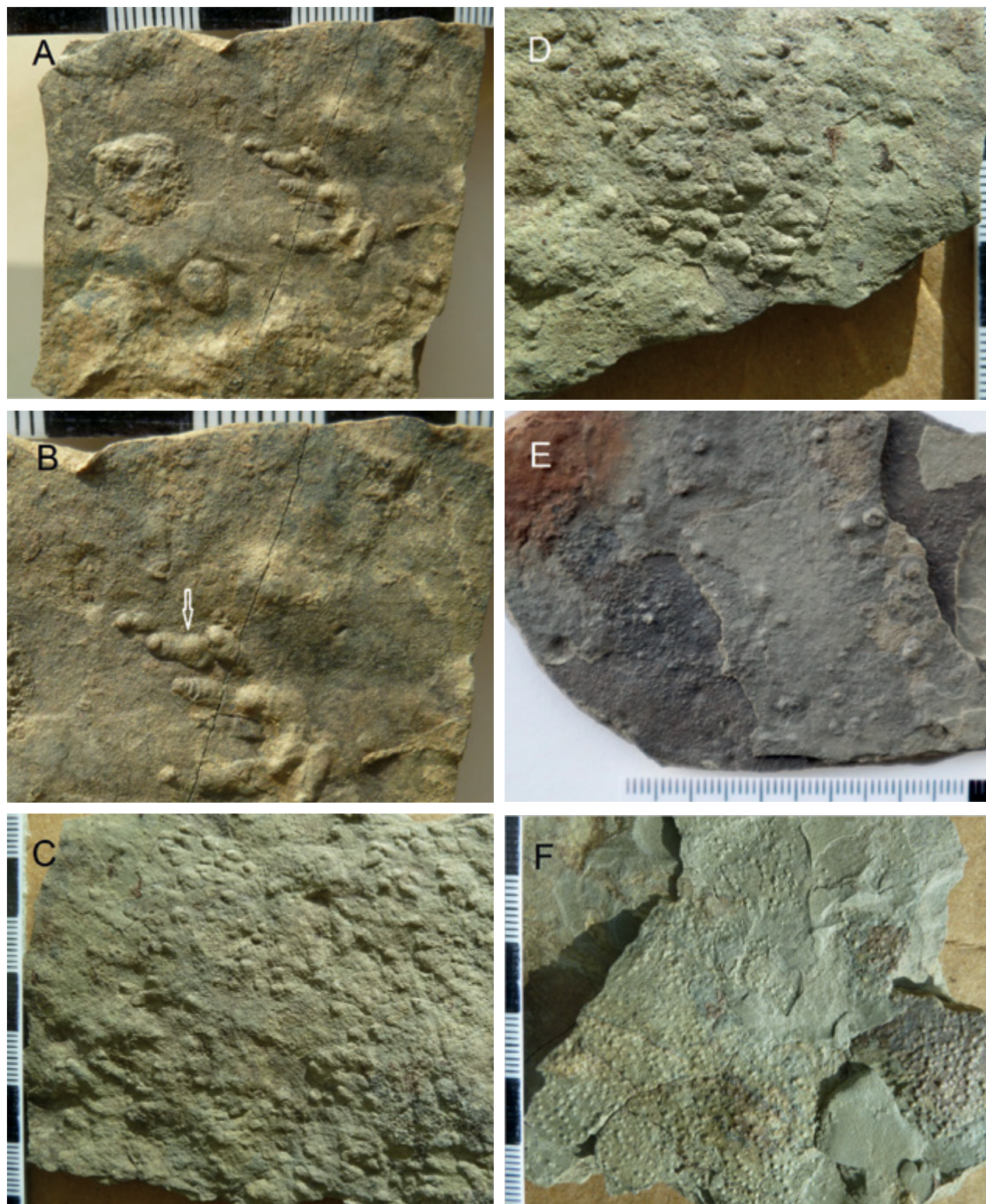


Fig. 4. Fossils of *Tymkivia primitiva*:

A – specimen IG KNU No. 17p195. Holotype of *Tymkivia primitiva*. Positive hyporelief. Kytaygorod outcrop. Komarovo Member; B – fragment of specimen IG KNU No. 17p195. Holotype of *Tymkivia primitiva* (white arrow). Positive hyporelief; C – specimen IG KNU No. 17p261. Three-dimensional casts of bodies *T. primitiva* in an inclined and lying position. Positive hyporelief. Tymkiv outcrop. Pilipy Member; D – fragment of specimen IG KNU No. 17p261; E – specimen IG KNU No. 17p257. Impressions of attachment anchors on the lower surface of layer 1 (right) and imprints of the upper end of the *Tymkivia* bodies on the lower surface of layer 2 (left). Positive hyporelief. Kytaygorod outcrop. Komarovo Member; F – specimen IG KNU No. 17p262. Mass accumulation of *Tymkivia* on two layers of mudstone. Positive hyporelief. Tymkiv outcrop. Pilipy Member

Organisms of a new species are usually found in mass aggregations or groups, while *Vaveliksia* is rather rare single specimens or small group settlements.

***Tymkivia primitiva* sp. nov.**

Etymology. From the Latin *primitiva* (primitive), because the impressions and casts of the bodies of the organism have a simple form and are devoid of signs of internal or external organs.

Holotype. IG KNU No. 17p195 (Fig. 4, A, B); from the left slope of the Ternava River valley near the village of Kytaygorod, Khmelnytskyi region; Late Ediacaran Komarovo Member (Studenitsa Formation, Kanilovka Group).

Holotype dimensions: Length of the sac-like body 5 mm, width 2 mm. The diameter of the attachment cone is about 1 mm, it protrudes above the rock level by less than 1 mm. The convex cast of the sac-shaped body protrudes above the lower surface of the rock by about 0.2 mm.

Description. The holotype (Fig. 4, B) is an elongated oval bag-shaped cast on the lower surface of a thin layer of mudstone. One end is wider and more rounded (taken here as the upper one), and the opposite end is more elongated with a conically rounded end. The edges of the imprint are clear, and the surface is smooth and complicated by minor deformations, probably of a post-mortem nature.



Fig. 5. Taphonomic variants of *Tymkivia* fossils:

A – specimen IG KNU No. 17p263. Impressions of attachment anchors on the lower surface of layer 1 (right) and imprints of the upper end of the *Tymkivia* bodies on the lower surface of layer 2 (left). Positive hyporelief. Tymkiv outcrop. Pilipy Member; B – specimen IG KNU No. 17p264. Mass accumulation of *Tymkivia*. Positive hyporelief. Tymkiv outcrop. Pilipy Member; C – specimen IG KNU No. 17p266. Body prints of *T. primitiva* on the bottom of a sandstone slab. Positive hyporelief. Berezivka outcrop. Pilipy Member; D – specimen IG KNU No. 17p266. Impressions of a transverse section of *T. primitiva* bodies filled with clay on the upper surface of a sandstone layer. Berezivka outcrop. Pilipy Member

Next to the holotype are seven other *Tymkivia* prints with approximate size and morphology.

Taphonomy and preservation. The most common form of preservation shows that only anchor attachments are preserved in the form of conical or round-conical relief protrusions at the bottom of mudstone beds (Fig. 4, F; Fig. 5, A, B). Attachment anchors with body imprints are much rarer (Fig. 4, A–D; Fig. 5, C). Sometimes there is such a variant of volumetric preservation: conical anchors in the lower plane of the layer (Fig. 5, C) and a ring or oval ridge on the upper surface on the opposite side (Fig. 5, D). The rock layer thickness in such cases is 5–10 mm, and the wall width of the annular ridge is in the range of 0.5–1 mm. Such fossils show a cross-section of the body of organisms (Fig. 6). The inner part of such three-dimensional casts is often filled with finely dispersed clay mass (Fig. 5, D). These fossils often show a unidirectional recumbent or reclining posture of organisms during burial; they recorded the direction of the mudflow front, leading to rapid burial (Fig. 4, C, D; Fig. 5, C).

Specimens IG KNU No. 17p261 (Fig. 4, C), IG KNU No. 17p266 (Fig. 4, D), and IG KNU No. 17p263 (Fig. 5, A) show a cast of a body buried in an inclined position. The lower conical end protrudes at an acute angle to the plate surface (positive hyporelief). The rest of the body and the upper end is inside the rock layer. Concave imprints at the bottom of the upper layer show the spherical shape of the upper end of *Tymkivia*'s body. (see Fig 4, E; Fig. 5, A). The length of the visible

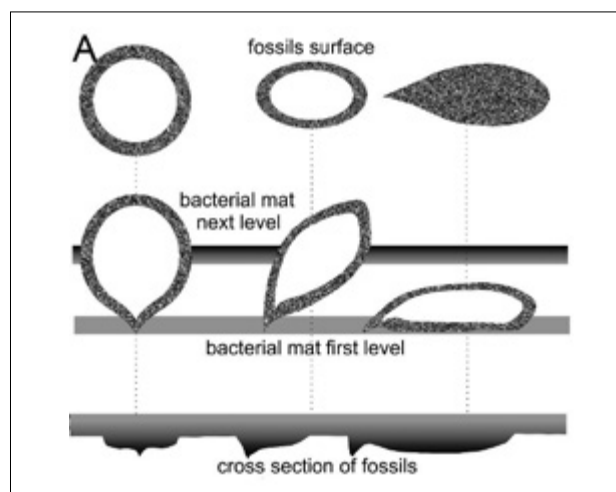


Fig. 6. Reconstruction of the formation processes of various taphonomic variants of *T. primitiva*

part is 3.5 mm, the width is 3 mm; the anchoring width is about 0.5 mm. Pointed and oval-conical fastening anchors cover the bottom of the slab. More than 20 *Tymkivia* fossil slabs are not presented in this work because they are similar to those described here.

Comparison. *Tymkivia primitiva* differs from *Vaveliksia velikanovi* Fedonkin in a much smaller size (*Tymkivia* has a maximum body length of up to 15 mm, a width of 5 mm vs *Vaveliksia* has a maximum body length of up to 80 mm, a width of 20 mm) (Velikanov et al., 1983). *Tymkivia*'s absence of an attachment disc.

Prevalence. Ukraine, Podillia, Khmelnytskyi region, Late Ediacaran, Kanilovka Group.

Material. The holotype and IG KNU No. 17p257–17p260, Kytaygorod village, Komarovo Member (Studenitsa Formation, Kanilovka Group, Late Ediacaran); specimens No. 17p261–17p265, Tymkiv village; specimens No. 17p266–17p268, Berezivka village; specimens No. 17p269, 17p270, Khrebtiviv village, Pilipy Member (Studenitsa Formation, Kanilovka Group, Late Ediacaran). All outcrops are located in the Khmelnytskyi region.

Discussion

Tymkivia primitiva shows a close similarity with bacterial mats that served as a support platform for fixation on the seabed (Fig. 4, E, F; Fig. 5, A–C). The fossils are “death masks”, meaning that they are imprints of the inner surface of bodies and imprints on the surface of bacterial films (Fig. 4, A–F; Fig. 5, A–D). This type of preservation of soft-bodied organisms is caused by a rather rapid pyritization process of organic surfaces during burial (Gehling, 1999). Such a taphonomic process was widespread in the Late Precambrian due to the formation of a biochemical membrane of a bacterial mat at the boundary between the anoxic sediment zone and the oxygenated water column (Gibson et al., 2018). An analysis of the morphology of taphonomic variants of *T. primitiva* suggests that this fossil belongs to benthic algae (Fig. 7, A, B). The grounds for such a hypothesis are as follows: a) the absence of a mouth, anus, and internal organs on the prints; b) in all likelihood, the organisms received nutrients by their diffusion through the surface; c) the close connection of extinct creatures with bacterial mats is obvious.

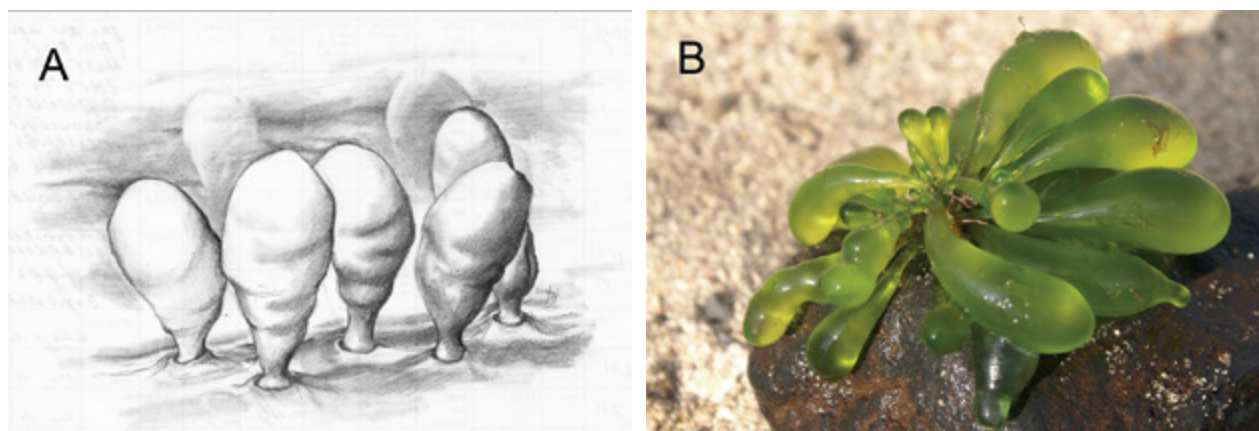


Fig. 7. Reconstruction of *Tymkivia* and modern algae:

A – reconstruction of *Tymkivia primitiva* (author Andrii Martyshyn, art editor Serhiy Solodkyi); B – settlement of modern green algae *Boergesenia forbesii* (Wikipedia.org)

Recently, it has been widely believed that the basis of the diet of Ediacaran organisms was a suspension of semi-decomposed organic matter (Sperling et al., 2011; Rahman et al., 2015). This type of diet is consistent with the putative fossil interpretation. We have found a characteristic pattern between the size parameters of *Tymkivia* and the dispersion of rocks. The sizes of imprints of the organisms in accumulations in mudstones are usually smaller than in sandstones.

Numerous carbonaceous compression fossils of the oldest benthic macroalga *Longfengshania* have been found in the Tonian deposits of China and Canada (Du, 1982; Hofman, 1985; Jing et al., 2022). Modern green algae *Boergesenia*, *Valonia*, and *Derbesia* are similar to *Tymkivia* morphologically and probably in their ecology (Fig. 7, A, B). The difference lies in the method of attachment to the substrate: modern plants are attached to solid areas of the bottom with the help of rhizoids. These modern algae are also characterized by the formation of mass settlements. Other interpretations cannot be unambiguously ruled out. For example, a fossil may be a Medusozoa (Cnidaria) polyp stage. Such a possibility exists in connection with the discovery by the author in the deposits of the Late Ediacaran in Podolia of a large number of fossils of probable Medusozoa (unpublished data).

Conclusions

Tymkivia primitiva gen. nov. sp. nov. was a widespread organism in the Volyn-Podilsky sedimentation basin. The appearance and disappearance of these organisms are the benchmarks of the stage of sedimentation of the Kanylivka Formation. *Tymkivia primitiva* shows a set of morphological parameters and preservation patterns that allow them to be interpreted as a benthic plant fossil, possibly belonging to green algae because of morphological similarity with modern representatives. The appearance of these organisms at the end of the Ediacaran period indicates the formation of a biotic association of the Phanerozoic type on the eve of the “Cambrian explosion”.

Acknowledgments

The author would like to express their gratitude to S.S. Solodkyi, who devoted participant in field expeditions and also performed the artistic editing of the reconstruction of *Tymkivia* and helped to reconstruct the scheme of taphonomic processes. The author is also grateful to the editor-in-chief of the magazine O.B. Klimchuk, who gave valuable advice and helped transform the manuscript into a meaningful text. I express my deep gratitude to all anonymous reviewers and editors for their effective help and assistance in working on the text of the article.

REFERENCES

- Du R. 1982. The discovery of the fossils such as *Chuaria* in the Qingbaikou System in northwestern Hebei and their significance. *Geology Review* (Beijing), 28: 1–7 (in Chinese, with English abstract).
- Gehling J.G. 1999. Microbial mats in terminal Proterozoic siliciclastics: Ediacaran death masks. *PALAIOS*, 14: 40–57.
- Glaessner M.F., Walter M.R. 1975. New Precambrian fossils from the Arumbera Sandstone, Northern Territory, Australia. *Alcheringa: An Australian Journal of Palaeontology*, 1: 59–69.
- Gnilovskaya M.B. 1971. Most ancient water plants of Vendian of Russian platform (Late Precambrian). *Paleontologicheskii Journal*, 3: 101–107 (in Russian).
- Gozhik P.F. (Ed.) 2013. Stratigraphy of the Upper Proterozoic, Palaeozoic and Mesozoic of Ukraine. Kyiv: Logos (in Ukrainian).
- Gibson B., Schiffbauer J.D., Darroch S.A.F. 2018. Ediacaran-style decay experiments using mollusks and sea anemones. *PALAIOS*, 33: 185–203. <https://dx.doi.org/10.2110/palo.2017.091>
- Hofmann H.J. 1985. The mid-Proterozoic Little Dal macrobiota, Mackenzie Mountains, north-west Canada. *Paleontology*, 28: 331–354.
- Ivantsov A. Yu., Malakhovskaya Ya.E. 2002. Giant traces of Vendian animals. *Doklady Akademii Nauk*, 385 (3): 382–386 (in Russian).
- Ivantsov A. Yu., Malakhovskaya Ya.E., Serezhnikova E.A. 2004. Some Problematic Fossils from the Vendian of the Southeastern White Sea Region. *Paleontological Journal*, 38 (1): 1–9.
- Jing Y., Chen Z.-Q., Anderson R.P., Wang X., Zheng Z., Feng X. 2022. Microscopic and geochemical analyses of the Tonian Longfengshan biota from the Luotuoqing Formation (Hebei Province, North China) with taphonomic implications. *Precambrian Research*, 382 (106899): 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106899>
- Korenchuk L.V., Ishchenko A.A. 1980. Stratotype Sections of the Vendian Kanilovka Group in the Dniester area. Kyiv: IGN AN USSR (in Russian).
- Kumar S., Pandey S.K. 2008. *Arumberia* and associated fossils from the Neoproterozoic Maihar Sandstone, Vindhyan Supergroup, Central India. *Journal of the Palaeontological Society of India*, 53(1): 83–97.
- Martyshyn A., Uchman A. 2021. New Ediacaran fossils from the Ukraine, some with a putative tunicate relationship. *PalZ*, 95: 623–629. <https://doi.org/10.1007/s12542-021-00596-1>
- McMahon W.J., Davies N.S., Liu A.G., Went D.J. 2022. Enigma variations: characteristics and likely origin of the problematic surface texture *Arumberia*, as recognized from an exceptional bedding plane exposure and the global record. *Geological Magazine*, 159: 1–20. <https://doi.org/10.1017/S0016756821000777>
- Nesterovsky V.A., Martyshyn A.I., Chupryna A.M. 2018. New biocenosis model of Vendian (Ediacaran) sedimentation basin of Podolia (Ukraine). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27: 95–107. <https://doi.org/10.15421/111835>
- Paliy V.M. 1976. Remains of soft-bodied fauna and trace fossils from Upper Precambrian and Lower Cambrian deposits in Podolia. In: *Paleontology and Stratigraphy of Upper Precambrian and Lower Cambrian in Southwestern areas of the East European Platform*. Kyiv: Naukova Dumka, pp. 63–77 (in Russian).
- Rahman I.A., Darroch S.A., Racicot R.A., Laflamme M. 2015. Suspension feeding in the enigmatic Ediacaran organism *Tribrachidium* demonstrates complexity of Neoproterozoic ecosystems. *Science Advances*, 1: e1500800
- Seilacher A. 1955. Spuren und Fazies im Unterkambrium. In *Beiträge zur Kenntnis des Kambriums in der Salt Range (Pakistan)*. (Ed. Schindewolf O.H., and Seilacher A.). *Akademie der Wissenschaften und der Literatur in Mainz, Abhandlungen der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse*, 10: 373–399.
- Sperling E.A., Peterson K.J., Laflamme M. 2011. Rangeomorphs, *Thectardis* (Porifera?) and dissolved organic carbon in the Ediacaran oceans. *Geobiology*, 9: 24–33.
- Velikanov V.A., Aseeva E.A., Fedonkin M.A. 1983. The Vendian of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).

Received 07.03.2023

Received in revised form 02.05.2023

Accepted 22.05.2023

Tymkivia primitiva gen. nov. sp. nov. – новий вид скам'янілостей з відкладів канилівської серії пізнього едіакарію (венду) Поділля, Україна

A.I. Мартишин

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

E-mail: podolimirus@gmail.com

У південно-західній частині України вздовж долини р. Дністер та його лівих приток відслонюється на поверхні потужна товща відкладів едіакарію (венду). Стратиграфія та літологія цих відкладів вивчені досить детально, але інформація про скам'янілі рештки все ще дуже обмежена. Найнижчий рівень вивченості має осадова товща канилівської серії. Скам'янілі рештки організмів *Tymkivia primitiva* gen. nov. sp. nov. зібрані з мілководних

морських теригенних відкладів верхнього діакарію (венду) Поділля. Фосилії є зліпками внутрішньої поверхні та відбитками на поверхні бактеріальних матів («посмертними масками») малорозмірних седентарних організмів мішководної форми. Скам'янілості демонструють тісний зв'язок вимерлих організмів з бактеріальними матами, які виконували функцію опорної платформи на поверхні мулистого осаду. Скупчення численних відбитків на нижній площині шарів аргілітів та алевролітів свідчать про існування масових поселень організмів *Tymkivia* у Волино-Подільському седиментаційному басейні у пізньовендський час. Широкий діапазон морфологічних варіантів скам'янілостей відображає тафonomічні процеси захоронення м'якотілих організмів. На скам'янілостях не виявлено морфологічних деталей, які можна було б інтерпретувати як оральний і анальний отвори та внутрішні органи. Скупчення *Tymkivia* знаходяться в асоціації з рештками бактеріальних матів, обвугленими рештками водоростей *Vendotaenia*, *Kanilovia* та проблематичними стрижневидними скам'янілостями *Harlaniella*. Сукупність морфологічних ознак скам'янілих решток дозволяє припустити приналежність *Tymkivia* до бентосних водоростей завдяки морфологічній схожості з деякими сучасними зеленими водоростями. Не можна також виключати варіант інтерпретації *Tymkivia* як скам'янілостей стадії поліпів *Medusozoa* (*Cnidaria*). Поява та зникнення цих скам'янілостей у розрізі відкладів є реперами канилівського етапу осадконакопичення.

Ключові слова: едіакарій; венд; тафonomia; Поділля; зелені водорості.

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.275507>
УДК 549(477)

Підсумкове видання з історії мінералогії і мінералогічних знань в Україні

І.М. Наумко

Рец. на кн.: Павлишин Володимир, Матковський Орест, Довгий Станіслав
Історія мінералогії в Україні. Від 90-х років ХХ ст. донині. Київ, 2022. 612 с.

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна
E-mail: igggk@mail.lviv.ua, naumko@ukr.net

У книзі підсумовано відомості з історії мінералогічних досліджень і знань в незалежній Україні (від 1991 р.). Схарактеризовано всесвітньо відомі наукові школи, сформовані у другій половині ХХ ст. (1940–1990 рр.): регіонально-мінералогічну, термобарогеохімічну, кристалохімічну, фізики мінералів. Проаналізовано здобутки учених у регіональній, систематичній та генетичній мінералогії, кристалохімії і фізиці мінералів, мінералогічній кристалографії, біо- та наномінералогії, експериментальній, космічній і прикладній мінералогії, музейній справі тощо. Показано, що після кризи 1990-х років розширюються і поглиблюються традиційні і започатковуються нові наукові напрями, зокрема наномінералогія та екологічна мінералогія, швидко зростає кількість мінералів, відкритих у надрах України, з'являються нові періодичні видання, підручники і посібники, ведеться робота зі створення сучасного монографічного зведення – Української мінералогічної енциклопедії. Аналіз отриманих мінералого-історичних знань націлює на нові здобутки в царині мінералогії у рамках наступного магістрального шляху досліджень – «розвивати всі наукові напрями мінералогії, але з акцентом на надання пріоритетного значення регіонально-мінералогічним і прикладним роботам». Показано шляхи розвитку і долю мінералогії у кризових умовах, особливо на сучасному етапі у складних геополітичних умовах сьогодення, зокрема в час війни із зовнішнім агресором. Тому видання своєчасне й потрібне як фахівцям у галузі наук про Землю, насамперед геологам і мінералогам – науковцям, викладачам, практикам, так і тим, хто цікавиться історією науки.

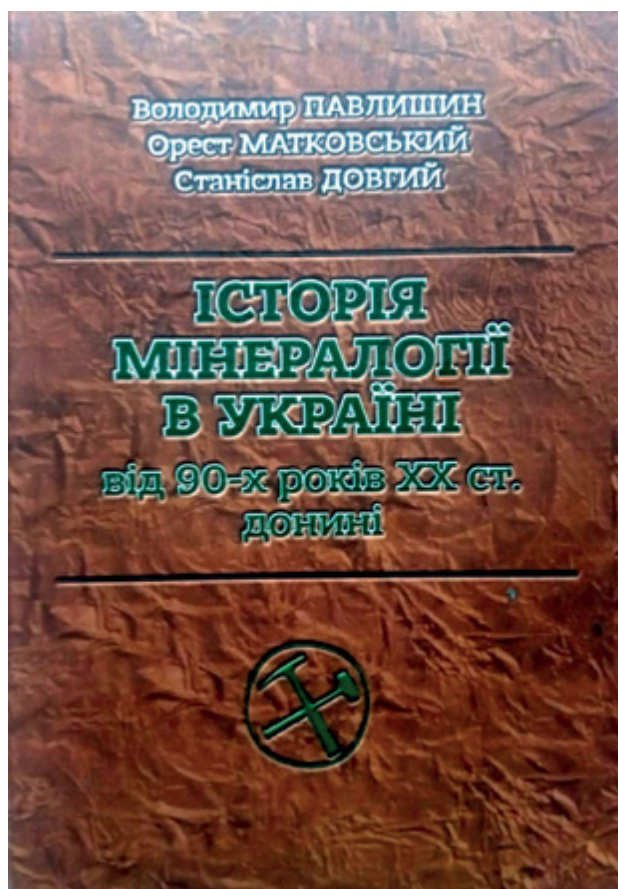
Ключові слова: мінералогія; мінерал; корисні копалини; історія; періодизація; наукові школи; Українська мінералогічна енциклопедія; науки про Землю; Україна.

Цитування: Наумко І.М. Підсумкове видання з історії мінералогії і мінералогічних знань в Україні. *Геологічний журнал*. 2023. № 2 (383). С. 68–74. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.275507>

Citation: Naumko I.M. 2023. Final edition on the history of mineralogy and mineralogical knowledge in Ukraine. *Geologičnij žurnal*, 2 (383): 68–74. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.275507>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NG-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)



Мінералогія, як найдавніша дисципліна з наук геологічного циклу, ще задовго до виділення геології в самостійний науковий напрям фактично заклала фундамент геологічних наук, які поступово з неї виділялися. І це природно, бо дефініцію «мінералогія» увів у літературу італійський натураліст Бернард Цезіус (Bernard Cesium) 1636 року саме для науки про всі природні викопні тіла. Історично ця фундаментальна наука здолала тривалий і складний шлях, тож не дивно, що її історія – це не лише історія першої природничої науки про Землю й природна історія мінерального царства, це певною мірою й історія розвитку і становлення суспільства, людської цивілізації. Це загалом стосується й історії мінералогії в Україні, яка розвивалася від найдавніших часів та Київської Русі, далі у складі імперій, зокрема Російської та Австро-Угорської, і до сучасності, вже в Україні, і яку Володимир Павлишин, Орест Матковський, Станіслав Довгий зреалізували, як у книзі про історію розвитку мінералогічних знань в Україні від часу створення 1918 р. двох доленосних інституцій – Українського геологічного комітету та

Української академії наук (Павлишин та ін., 2018), так і в розвиток означених ідей в монографії у двох частинах з історії мінералогії в Україні: від глибокої давнини до 90-х років ХХ ст. (Павлишин та ін., 2019) та від 90-х років ХХ ст. донині (Павлишин та ін., 2022).

Ідея такого всебічного наукового видання історико-мінералогічного плану зародилася, за словами одного з авторів – Володимира Павлишина, у період його праці на Кольському півострові, коли він у довгу полярну ніч спостерігав за полярним сяйвом, яке освітлювало таємничу нічну Мончегорську тундру, і для нього, як світло далеких зірок, мінералогія була дороговказом для повернення в Україну. Тут він запалив ідеєю оспівування історії мінералогії двох майбутніх співавторів – Ореста Матковського і Станіслава Довгого, і тоді життєве кредо одного із них «До перемоги веде лише та дорога, яку прокладаєш сам» стало життєвим кредом усіх. Їх поєднали і зблизили не лише службові, а й людські стосунки, насамперед тому, що Світочем для них був академік Євген Костянтинівич Лазаренко, Учитель, Наставник, Товариш, Колега... Власне задумані книги з історії стародавньої, але вічно молодій фундаментальній природничій науці – мінералогії й з'явилися завдяки тісній співпраці цих учнів ученого зі світовим іменем, видатного українського мінералога і патріота, почесного члена Наукового товариства імені Шевченка (НТШ), академіка Є.К. Лазаренка.

Перша частина монографії «Історія мінералогії в Україні. Від давніх часів до 90-х років ХХ ст.» містить (Павлишин та ін., 2019), крім «Вступу з елементами історичного екскурсу», «Літератури» й «Іменного покажчика», п'ять фундаментальних розділів: «Основні віхи та періодизація історії мінералогії в Україні»; «Передісторія мінералогії (до XIII ст.)»; «Зародження мінералогії (XVIII ст.)»; «Становлення та розвиток мінералогії (XIX–1940-і роки)», «Золотий вік мінералогії в Україні (1940–1990-і роки)», наведені у ній матеріали належним чином вже оцінено (Наумко, 2021). На завершення цієї праці автори анонсували її продовження і запланували детальніше проаналізувати діяльність всесвітньо відомих наукових шкіл, обговорити сучасний стан розвитку і функціонування усіх підрозділів мінералогії в Україні (від 90-х років до сучасності), і, мабуть, що

найважливіше, обґрунтувати вибір стратегічного напрямку розвитку мінералогії з її долею визначальною роллю у стабілізації мінерально-сировинного комплексу України та зміцненні мінерально-сировинної бази держави у сучасних геополітичних умовах.

Тому у рецензованій нами другій частині монографії (Павлишин та ін., 2022) логічно продовжується етапність і нумерація фундаментальних розділів першої частини, а саме: розд. 6 «*Мінералогічні наукові школи*», розд. 7 «*Сучасний стан розвитку мінералогії в Україні, зародження наномінералогії (з 90-х років ХХ ст. донині)*», розд. 8 «*Шляхи розвитку та доля мінералогії України в кризових умовах*». Стислий зміст цих розділів схарактеризовано у «*Передмові*», в якій підсумково наголошено, що монографія у двох частинах загалом вперше охопила в історичному аспекті більшість, наскільки це можливо, розмаїтих і важливих наукових фактів і здобутків, що стосуються історії мінералогії в Україні, від прадавніх часів до сьогодення.

У розд. 6 «*Мінералогічні наукові школи*» насамперед викладається авторський підхід до дефініції «наукова школа»: це вагома і на високому рівні напрацьований науковий напрям, забезпечений авторитетними фахівцями, фундаментальними науковими працями і лабораторно-експериментальною базою. Історично першою в Україні науковою школою в галузі наук про Землю вважається Київська геологічна школа, зароджена і сформована в Університеті Св. Володимира у середині ХІХ – початку ХХ ст. (засновник К.М. Феоділактів). З виконаного огляду й узагальнення випливає, що у другій половині ХХ ст. (1940–1990 рр.) в Україні сформувалися чотири всесвітньо відомі мінералогічні наукові школи: регіонально-мінералогічна – академіка Євгена Лазаренка, термобарогеохімічна – професора Миколи Єрмакова, кристалохімічна – академіка Олександра Поваренних, фізики мінералів – професорів Івана Матяша, Олексія Платонова, Аркадія Таращана. Перша (під назвою мінералогічна) і друга зародилися і функціонують у Львівському національному університеті ім. Івана Франка та офіційно затверджені Міністерством науки і освіти України, дві інші – в Інституті геохімії і фізики мінералів АН УРСР (нині – Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення

ім. М.П. Семененка НАН України). Багаторічний доробок наукових шкіл детально обговорено за даними аналізу фундаментальних досліджень мінералогії окремих родовищ і перспективних рудопроявів щодо виявлення зв'язку мінералогенезу з рудоутворенням, з'ясування особливостей конституції, морфології, фізичних властивостей, генетичної природи та розподілу у природі окремих мінералів, акцентовано на нерозривності їхніх здобутків і Українського мінералогічного товариства (УМТ). Передусім це стосується регіонально-мінералогічної школи Є.К. Лазаренка. Наголошено, що ідеї, які складають основу наукових шкіл, отримали значний розвиток та функціонують і в інших наукових установах, закладах вищої освіти і виробничих організаціях, де вже склалися й свої власні наукові школи. Перелічено прямих й опосередкованих вихованців шкіл, серед яких доктори наук, професори П. Баранов, З. Бартошинський, О. Бобров, О. Брик, А. Вальтер, Д. Возняк, Т. Волкова, В. Венедиктов, С. Галій, С. Геворк'ян, А. Горовий, В. Грінченко, К. Деревська, Ю. Долгов, Н. Дудченко, В. Євтехов, О. Ємець, В. Загнітко, П. Заріцький, Ф. Зузук, В. Індутний, В. Калюжний, В. Квасниця, В. Ковалевич, М. Ковальчук, Є. Куковський, Г. Кульчицька, В. Курепін, Є. Лазаренко, Є. Лазько, О. Литвин, Ю. Ляхов, Г. Легкова, А. Матковський, О. Матковський, С. Мацюк, О. Митрохін, Ю. Мельник, І. Наумко, В. Нестеровський, І. Носирев, Г. Остапенко, В. Павлишин, М. Павлунь, Б. Панов, О. Петриченко, Б. Пирогов, А. Пізнюр, О. Пономаренко, І. Попівняк, В. Радчук, М. Рузіна, Ю. Русько, В. Семененко, А. Сиворонов, Л. Степанюк, В. Сьомка, М. Таран, О. Чепіжко, Б. Шаталін, Є. Шнюков, С. Шнюков, В. Шумлянський, Л. Шумлянський, Д. Щербак, М. Щербак, Б. Яковлев, інші знані учені. Віддано шану й тим, які підготували докторські дисертації, але не встигли захистити через передчасну смерть (Олександр Драгомирецький, Ігор Дудок, Богдан Заціха, Володимир Мельников, Едуард Янчук). Наприкінці розділу згадано наукові школи, які зародилися упродовж останніх років, але не встигли повнокровно вирити: мінералого-технологічна Б.І. Пирогова та В.Д. Євтехова (Кривий Ріг), мінералого-прикладна Ю.Ю. Юрка та Ю.О. Полканова (Сімферополь), біомінералогічна Ф.В. Зузука та О.Б. Брика (Луцьк, Київ).

Матеріали розд. 7 «**Сучасний стан розвитку мінералогії в Україні, зародження наномінералогії (з 90-х років ХХ ст. донині)**» характеризують період від здобуття Україною незалежності до тепер. Показано, що після кризи 1990-х років розширюються і поглиблюються традиційні і започатковуються нові наукові напрями, зокрема наномінералогія та екологічна мінералогія, швидко зростає число мінералів, відкритих у надрах України, з'являються нові періодичні видання («Мінеральні ресурси України», «Коштовне та декоративне каміння», «Геолог України», «Записки Українського мінералогічного товариства» тощо). Наголошено, що концептуальні засади державної мінерально-сировинної політики щодо використання стратегічно важливих для економіки країни корисних копалин окреслює однойменна монографія Д.С. Гурського (2008). Розвиткові мінералогії на цьому етапі сприяли підготовка та публікація сучасних навчальних видань: підручників і навчальних посібників, захисти понад 30 докторських дисертацій (як формально, так і опосередковано мінералогічного спрямування), матеріали VI–IX з'їздів УМТ та інших наукових форумів, зокрема періодичних наукових читань імені академіка Євгена Лазаренка, підсумкових фундаментальних публікацій, як наприклад, ґрунтовна 5-томна монографія «Мінерали Українських Карпат», чи статей на сторінках таких видань, як «Мінералогічний збірник», «Мінералогічний журнал», «Записки УМТ», «Наукові праці Інституту фундаментальних досліджень», участь українських мінералогів у наукових форумах в Україні і за рубежом. Питання мінералогії набули чи не першорядності в діяльності таких нових інституцій, як Державний гемологічний центр України (А.М. Ткаленко) та громадська організація «Спілка геологів України» (П.О. Загороднюк). Загалом продовжує втілюватися у життя стратегія досліджень наукової термінології і номенклатури українських назв мінералів: від «Словника українських назв мінеральних видів» до «Української мінералогічної енциклопедії». Принагідно наголосимо на такому відрядному факті, який оминули автори, як чільне місце мінералогічної тематики в роботі геологічної комісії НТШ – однієї з численних комісій

Товариства, заснованого 1873 р., яке в Україні радянською владою 1939 р. було закрито, а 1940 р. – ліквідоване і відновило діяльність лише 1989 р. на зорі незалежності.

Розвиток мінералогічних досліджень, диференційованих згідно із структурою мінералогічної науки (структури сучасного розгалуженого (структурованого) знання про мінерали), та досягнення за основними науковими напрямками проаналізовано відповідно до започаткованої ще Є.К. Лазаренком традиції: регіональна мінералогія, систематична мінералогія, генетична мінералогія, кристалохімія мінералів, фізика мінералів, мінералогічна кристалографія, експериментальна і фізико-хімічна мінералогія, біомінералогія, космічна мінералогія, наномінералогія, прикладна мінералогія, музейна справа (зокрема, мінералогічні музеї та мінералогічні пам'ятки природи України) тощо. Привертає увагу відсутність таких розділів, як «Нові мінерали» та «Ядерна мінералогія», хоча автори мали повну підставу додати ці дефініції до наведеної ними таблиці (рисунок на с. 181). В обговоренні кожного з цих пунктів (і численних підпунктів) наведено дані про захищені докторські дисертації, опубліковані наукові праці, насамперед монографічного плану, навчальні посібники, підручники, вперше описані та встановлені мінерали. Цікавими й пізнавальними є узагальнені дані щодо як хронології і динаміки відкриття мінералів у надрах України, так і розподілу мінералів за сингоніями та послідовності кристалографомінералогічних кларків для 32 видів симетрії (в порядку їхньої кристалографічної ієрархії) в земній корі та надрах України (рисунок на с. 340–341).

Відповідь на запитання, як розвивати мінералогію на сучасному етапі у складних геополітичних умовах сьогодення, автори спробували дати у розд. 8 «**Шляхи розвитку та доля мінералогії України в кризових умовах**». Ключовими поняттями при такому підході мають стати мінеральні ресурси та мінерально-сировинний комплекс, раціональне природокористування й створення нових гірничорудних галузей та роль мінералогії у цих процесах. Вирішення означеного доленосного питання власне й можливе лише за участі мінералогічної науки і практики, які нагромадили колосальний обсяг знань у галузі морфо-

логії, конституції, властивостей і генезису мінералів, багатофункціональної прикладної мінералогії. Україна як європейська держава, що здатна забезпечувати до 5 % видобутку мінеральної сировини (як це було ще донедавна), не може не розвиватися «мінералогічно». Тому магістральний шлях розвитку мінералогії в Україні автори вбачають у розвитку усіх фундаментальних і прикладних напрямів сучасної мінералогії з акцентом на особливе значення регіонально-мінералогічних робіт, які забезпечують чи не найбільший обсяг мінералогічних знань для практики. Вони справедливо вважають, що варто дослухатися до думки, висловленої свого часу В.І. Вернадським про те, що, на відміну від досягнень чистої науки, «...у теперішньому житті, для сучасників, суттєво більше важать великі досягнення прикладного знання.» (Павлишин та ін., 2022, с. 471), тобто про висунення і в наш час на передній план прикладної мінералогії як стимулу розвитку всіх наукових напрямів мінералогії. В контексті анонсованого шляху розвитку мінералогії в Україні запропоновано кілька пропозицій щодо створення в Україні нових гірничорудних галузей: рідкіснометалевої, золоторудної, каменебарвної, міднорудної, кварцової, фосфатної, сировина для яких в достатніх кількостях наявна у надрах. Особливого значення це набуватиме в умовах післявоєнного відновлення України, коли потреба у прикладних аспектах мінералогічних розвідок лише зростатиме. А засадничим має стати неформальне (реальне) поєднання наукових, освітніх та інноваційних аспектів, логічно представлених в інноваційній моделі розвитку на засадах виконання фундаментальних досліджень (за рахунок бюджетних коштів), і розвиток прикладної мінералогії (за рахунок позабюджетних коштів) як напряму, що стимулює розвиток усіх інших напрямів мінералогії та мінерально-сировинної бази України.

У **«Висновках»** автори відобразили сучасний проблемний стан мінералогічних досліджень в Україні і наголосили на нагальних потребах збалансування дієвого трикутника: геологічна освіта – геологічна наука – геологічна галузь, забезпечення рівномірності розвитку різних наукових напрямів, видання сучасних навчальних видань, створення сучасного монографічного зведення – Української мінера-

логічної енциклопедії. Акцентовано на нагальній потребі вжиття заходів щодо збереження, розвитку і зміцнення наукових мінералогічних шкіл, адже чи не найвагоміша перешкода розвитку мінералогії в Україні – це кадровий вакуум, природна втрата наукових кадрів старшого покоління, брак молодого поповнення. Тому на перший план має вийти такий магістральний шлях досліджень – *«розвивати всі наукові напрями мінералогії, але з акцентом на надання пріоритетного значення регіонально-мінералогічним і прикладним роботам»* (с. 503). Це насамперед стане підґрунтям для створення нових гірничорудних галузей: рідкіснометалевої, золоторудної, каменебарвної, міднорудної, кварцової, фосфатної. Пізнання ще не розкритих таємниць мінеральної речовини, розшифрування унікальної генетичної інформації, закодованої у конституції й властивостях природних мінералів, ретельне вивчення мінерального світу і сировинної бази держави на модернізованій лабораторній базі – ось складові успішного збереження та зміцнення світового статусу вітчизняної мінералогічної науки. У цьому контексті вже нетривіально видається й думка про створення нових структурних підрозділів мінералого-кристалографічного плану чи Інституту прикладної мінералогії.

Завершується книга детальним списком **«Літератури використаної та рекомендованої»**, отож зацікавлених читачів відсилаємо до першоджерел. Корисними є додаток **«Словник мінералів України»**, а також **«Іменний покажчик»**, які полегшують читачеві орієнтування у складній мінералогічній термінології, номенклатурі й символіці.

Книга «Історія мінералогії в Україні. Від 90-х років ХХ ст. донині» (2022) логічно продовжує попередні книги авторів «Здобутки мінералогії в Україні. До 100-річчя Геологічної служби України та Національної академії наук України» (2019) та «Історія мінералогії в Україні від глибокої давнини до 90-років ХХ ст.» (2020). У ній цілісно підведено підсумок історії мінералогії за весь час її розвитку в Україні, однак невіддільно від досягнень інших геологічних наук, позаяк справедливо вважається, що «Історія мінералогії є історією усіх інших наук» (Павлишин та ін., 2022, с. 7 (за В.М. Севергінін, 1798 (переклад наш. – І.Н.)). Такі

підходи, у світлі ідей Володимира Вернадського, видатного ученого-енциклопедиста, повністю поділяв і розвивав академік Євген Лазаренко, який, очоливши різнопрофільні мінералогічні дослідження на кафедрі мінералогії Львівського університету разом з Львівським геологічним товариством у 50-і роки ХХ ст., ствердив завдання мінералогічного вивчення найважливіших геологічних об'єктів України сумірним за результатами з геологічним зніманням території держави.

Отже, у підсумковому виданні з історії мінералогії і мінералогічних знань сконцентровано відомості з історії розвитку мінералогічних досліджень і знань в незалежній Україні (від 1991 р.) та показано шляхи розвитку і долю мінералогії в Україні у кризових умовах, особливо на сучасному етапі у складних геополітичних умовах сьогодення, зокрема в час війни із зовнішнім агресором. Тому це видання своєчасне і потрібне як фахівцям

у галузі наук про Землю, насамперед геологам і мінералогам – науковцям, викладачам, практикам, так і тим, хто цікавиться історією науки.

І наостанок. Співавтори книги – Володимир Павлишин, Орест Матковський, Станіслав Довгий, як справжні патріоти України і мінералогії в Україні, усе своє творче життя, усі свої знання і таланти поклали на вівтар розвитку і популяризації цієї фундаментальної науки, і в цьому досягли значних висот, визнання й пошани. І переконливим доказом вагомості здобутків цих сподвижників мінералогії в історії мінералогії, мінералогічних досліджень і знань стало присудження їм Премії імені Є.К. Лазаренка Національної академії наук України за видатні результати в галузі мінералогії, кристалографії і петрографії (Відділення наук про Землю НАН України) за цикл наукових праць «Історія мінералів і мінералогії» (2022 р.).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Наумко І.М. Нове оригінальне видання з історії мінералогічних знань і здобутків мінералогії в Україні. *Мінерал. журн. (Mineral. Journ.)*. 2020. Т. 42, № 1. С. 86–88.
- Наумко І.М. Грунтовне видання з історії мінералогії в Україні. *Геол. журн.* 2021. № 1 (374). С. 81–85. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.1/196974>
- Павлишин Володимир, Матковський Орест, Довгий Станіслав. Здобутки мінералогії в Україні. До 100-річчя Геологічної служби України та Національної академії наук України. Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2018. 146 с.
- Павлишин Володимир, Матковський Орест, Довгий Станіслав. Історія мінералогії в Україні. Від глибокої давнини до 90-х років ХХ ст. Київ, 2019. 424 с.
- Павлишин Володимир, Матковський Орест, Довгий Станіслав. Історія мінералогії в Україні від 90-х років ХХ ст. донині. Київ, 2022. 612 с.

Надійшла до редакції 15.03.2023
Надійшла у ревізованій формі 03.04.2023
Прийнята 10.04.2023

REFERENCES

- Naumko I.M. 2020. New original issue on the history of mineralogical knowledge and achievements of the mineralogy in Ukraine. *Mineralogical Journal*, 42, 1: 86–88 (in Ukrainian).
- Naumko I.M. 2021. A thorough edition on the history of mineralogy in Ukraine. *Geologičnij žurnal*, 1 (374): 81–85. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.1/196974> (in Ukrainian).
- Pavlyshyn Volodymyr, Matkovskiy Orest, Dovhyi Stanislav. 2018. Achievements of the Mineralogy in Ukraine. To the 100th anniversary of the Geological Survey of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv: Institute of Gifted Child of NAPS of Ukraine (in Ukrainian).
- Pavlyshyn Volodymyr, Matkovskiy Orest, Dovhyi Stanislav. 2019. History of Mineralogy in Ukraine. From ancient times to the 90s of the 20th century. Kyiv (in Ukrainian).
- Pavlyshyn Volodymyr, Matkovskiy Orest, Dovhyi Stanislav. 2022. History of Mineralogy in Ukraine from 1990s to the present day. Kyiv (in Ukrainian).

Received 15.03.2023
Received in revised form 03.04.2023
Accepted 10.04.2023

Final edition on the history of mineralogy and mineralogical knowledge in Ukraine

Book Review: Pavlyshyn Volodymyr, Matkovskiy Orest, Dovhyi Stanislav

History of Mineralogy in Ukraine from 1990's to the present day. Kyiv, 2022. 612 p.

I.M. Naumko

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

E-mail: igggk@mail.lviv.ua, naumko@ukr.net

Information on the history of mineralogical research and knowledge in the independent Ukraine (since 1991) is summarized in the book. The world-famous scientific schools formed in the second half of the 20th century (1940–1990): regional mineralogical, thermobarogeochemical, crystallochemical, mineral physics are characterized. The achievements of scientists in regional, systematic and genetic mineralogy, crystal chemistry and mineral physics, mineralogical crystallography, bio- and nano-mineralogy, experimental, space and applied mineralogy, museum work, etc. were analyzed. It is shown that after the crisis of the 1990s, traditional scientific directions are expanding and deepening, and new scientific directions are being initiated, in particular nanomineralogy and ecological mineralogy, the number of minerals discovered in the depths of Ukraine is growing rapidly, new periodical editions, textbooks and manuals are appearing, work is underway to create of the modern monographic summary – the Ukrainian mineralogical encyclopedia. The analysis of the obtained mineralogical and historical knowledge aims at new achievements in the field of mineralogy within the framework of the next major research path – «to develop all scientific directions of mineralogy, but with an emphasis on giving priority to regional mineralogical and applied works». The publication shows the ways of development and the fate of mineralogy in crisis conditions, especially at the modern stage in the complex geopolitical conditions of today, in particular during the war with an external aggressor, therefore, it is timely and necessary, both for specialists in the field of Earth sciences, first of all, for geologists and mineralogists – scientists, teachers, practitioners, and for those who are interested in the history of science.

Keywords: *mineralogy; mineral; minerals; history; periodization; scientific schools; Ukrainian mineralogical encyclopedia; Earth sciences; Ukraine.*

GEOLOGIČNIJ ŽURNAL

The Journal covers the entire range of disciplines of geological science and practice and aims to publish high-quality scientific works including original research, reviews, short scientific communications, news of scientific life, biographical materials, and more. The focus is on geological studies relevant to Ukraine and other Eastern European regions, but studies of other regions of the world are also encouraged if they are of international scientific interest.

The journal is aimed to a wide range of scholars of geological disciplines, practitioners, lecturers, engineers, and graduate students.

The Journal provides open access to the articles and does not charge any article processing fee.

- Founders:
 - Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine;
 - National Academy of Sciences of Ukraine.
- Issued quarterly.
- Languages: Ukrainian, English.
- Publication of the journal is funded by the National Academy of Sciences of Ukraine.
- Materials are published in Ukrainian and English.
- The journal is listed as a scientific professional edition of Ukraine (category «Б»), specialties 04 – “Geological Sciences” and 103 - «Earth Sciences» (Ministry of Education and Science of Ukraine 02.07.2020 №886).

Manuscripts, galley proofs and other correspondence should be addressed to:

Geological Journal, Institute of Geological Sciences

O. Honchara str., 55 b, Kyiv-54, Ukraine, 01601

Phone: 380444869446

E-mail: geolzhurnal@nas.gov.ua

