

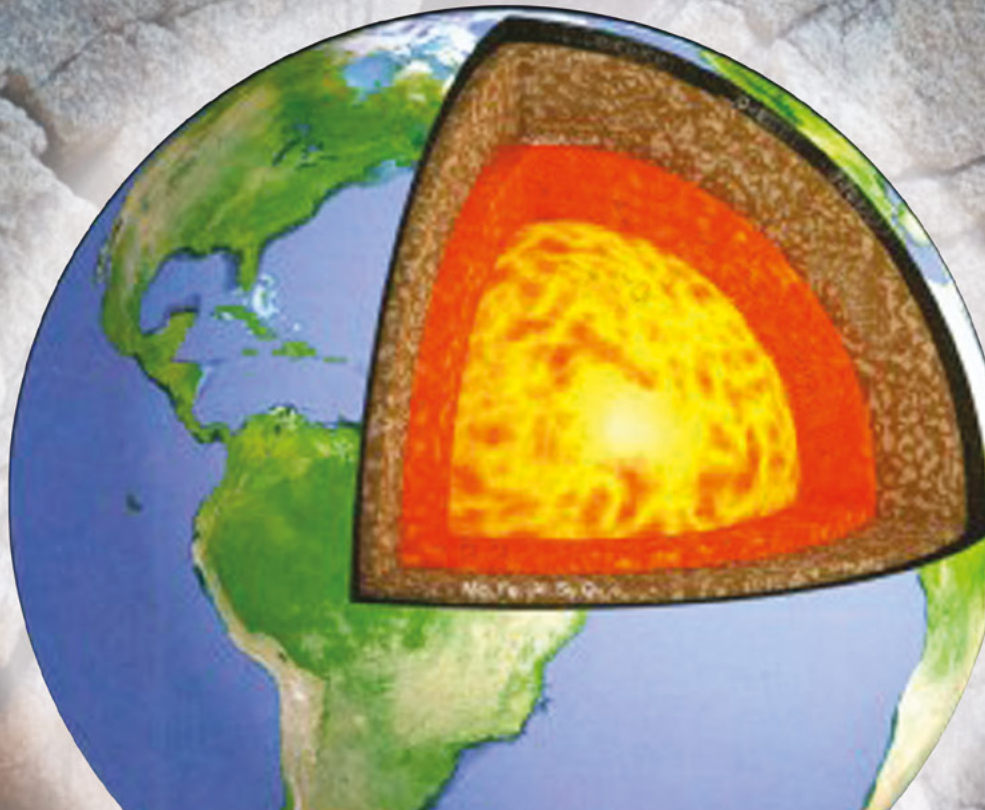
ISSN 1025-6814 (Print)  
ISSN 2522-4107 (Online)

# ГЕОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ



## GEOLOGIČNĪJ ŽURNAL

**1** (394)  
2026



**ЗАСНОВНИКИ:**

Національна академія наук України  
Інститут геологічних наук НАН України

**ВИДАВЕЦЬ:**

Інститут геологічних наук НАН України

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ****Головний редактор**

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

**Заступник головного редактора**

ШЕХУНОВА С.Б. (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)

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)

ФАЙБІШЕНКО Б. (Національна лабораторія  
Лоуренса Берклі, Відділ наук про Землю та  
навколишнє середовище, Берклі, Каліфорнія, США)

**FOUNDERS:**

National Academy of Sciences 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**

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

**Deputy Editor-in-Chief**

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

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

BAYARI S. (Hacettepe University, Ankara, Turkey)

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

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

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

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

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

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

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

FAYBISHENKO B. (Lawrence Berkeley National  
Laboratory, Earth and Environmental Sciences Area,  
Berkeley, CA, USA)

Ідентифікатор друкованого медіа в Реєстрі суб'єктів у сфері медіа R30-03389, присвоєний згідно  
з рішенням № 751 від 14.03.2024 р. Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення

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



GEOLOGIČNII  
ŽURNAL

1 (394)  
2026

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

## Зміст

### Дослідницькі та оглядові статті

- Boyarina N.I.* Analysis of the Upper Pennsylvanian phytazonal units of the Donets Basin and the Northern Caucasus using the ecostratigraphic approach ..... **3**
- Yakushyn L.M., Shevchuk O.A., Ishchenko I.I., Vajda V.* Early Cretaceous (Albian) strata identified by palynology in the base of the Pradniprovska-2 well, Black Sea shelf, Ukraine ..... **21**
- Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В., Висоцький О.Б., Баран А.М.* Уран-свинцевий вік за цирконом кристалічних порід Інгульського мегаблоку.... **31**
- Григорчук К.Г., Гнідець В.П., Кошіль Л.Б., Яковенко М.Б.* Літофізична будова відкладів середнього девону Переддобрудзького прогину в контексті тришарової моделі резервуарів.... **48**
- Harasymchuk V.Yu., Medvid H.B., Telehuz O.V.* Hydro-geochemical Settings of the Boryslav–Pokuttia Oil and Gas Bearing Area within the Carpathian Oil and Gas Bearing Province, Ukraine ..... **59**
- Bugai D.O.* Radioactive Contamination of Groundwater in the Chernobyl Exclusion Zone: Current Status, Long-Term Trends, and Challenges in Monitoring System Modernization..... **73**

### Із історії науки

- Веклич О.Д.* Дмитро Єлисейович Макаренко – відомий палеонтолог-стратиграф України, популяризатор геологічної науки, енциклопедист, історик геологічних досліджень (до 100-річчя від дня народження)..... **91**

## Contents

### Research and Review Papers

- Boyarina N.I.* Analysis of the Upper Pennsylvanian phytazonal units of the Donets Basin and the Northern Caucasus using the ecostratigraphic approach..... **3**
- Yakushyn L.M., Shevchuk O.A., Ishchenko I.I., Vajda V.* Early Cretaceous (Albian) strata identified by palynology in the base of the Pradniprovska-2 well, Black Sea shelf, Ukraine ..... **21**
- Stepanyuk L.M., Shumlyansky L.V., Vysotsky O.B., Baran A.M.* Uranium-lead zircon age of crystalline rocks of the Inhul domain ..... **31**
- Hryhorchuk K.H., Hnidets V.P., Koshil L.B., Yakovenko M.B.* Lithophysical structure of middle devonian deposits of the Dobrudja foredeep in the context of the three-layer reservoir model..... **48**
- Harasymchuk V.Yu., Medvid H.B., Telehuz O.V.* Hydro-geochemical Settings of the Boryslav–Pokuttia Oil and Gas Bearing Area within the Carpathian Oil and Gas Bearing Province, Ukraine..... **59**
- Bugai D.O.* Radioactive Contamination of Groundwater in the Chernobyl Exclusion Zone: Current Status, Long-Term Trends, and Challenges in Monitoring System Modernization..... **73**

### From the History of Sciences

- Veklych O.D.* Dmytro Yelyseyovych Makarenko – a famous paleontologist-stratigrapher of Ukraine, popularizer of geological science, encyclopedist, historian of geological research (to the 100th anniversary of his birth)..... **91**

**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](mailto:geojournal@igs-nas.org.ua)

**Відповідальний секретар** Н.І. Дугіна

**Редактор** І.І. Смаль

**Технічний редактор** С.О. Шадріна

**Комп'ютерна верстка** Н.К. Резнік

---

Підп. до друку 25.09.2025 р. Формат 60x84/8.  
Гарн. Fira Sans. Ум. друк. арк. 13,49. Обл.-вид. арк. 15,37.  
Зам. 7829 від 22.10.2025.

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.343227>

UDK 561:551.7:571.8 (477.6, 470.631) (551.735.2)

## Analysis of the Upper Pennsylvanian phytazonal units of the Donets Basin and the Northern Caucasus using the ecostratigraphic approach

E-mail: [nboyarina@ukr.net](mailto:nboyarina@ukr.net),  
<http://orcid.org/0000-0001-5316-4090>

Received / Надійшла до редакції:  
11.11.2025

Received in revised form /  
Надійшла у ревізованій формі:  
12.01.2026

Accepted / Прийнята:  
02.02.2026

N.I. Boyarina

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

**Аналіз верхньопенсильванських фітозональних підрозділів Донецького басейну та Північного Кавказу із застосуванням екостратиграфічного підходу**

N.I. Бояріна

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

**Keywords:** phytazonation, palaeophytocoenotic changes, vegetation differentiation, Late Pennsylvanian, Donets Basin, Northern Caucasus.

**Ключові слова:** фітозональність, палеофітоценотичні зміни, диференціація рослинності, пізній пенсильваній, Донецький басейн, Північний Кавказ.

Floristic, palaeophytocoenotic and palaeoecological analyses of the Late Pennsylvanian vegetation cover of the Donets Basin and the Northern Caucasus were conducted for the time intervals of five macrofloral zones to substantiate the Upper Pennsylvanian phytazonal units in the context of palaeoecosystem changes. The vegetation cover of each basin was defined by a type of differentiation reflecting plant community distribution and developmental features of plant communities shaped by ecological niche dynamics. The vegetation cover in the Donets intracraton basin with post-rift paralic setting, where glacioeustatic sea level changes had a significant impact, was characterised by a spatial differentiation into plant communities of coastal lowlands, deltaic and floodplain plains, and river valley slopes in low-relief terrains and the emergence of new ecological niches while changing dominant landscape types. The vegetation cover in the intramontane basin of the Northern Caucasus with a fluvio-lacustrine setting, where a spatial distribution of landscapes were influenced by changes in a local base level of erosion controlled by orogenic processes, was characterised by a catenary differentiation into plant communities of lacustrine coasts, deltaic-floodplain valleys and river valley slopes in sloping terrains with increased plant species richness as a manifestation of the ecotone effect and the emergence of new ecological niches as a result of niche overlap. The time intervals of macrofloral zones are aligned with the stages of development of vegetation cover that are distinguished by progressive or regressive phytocoenotic changes and phytocoenogenetic transformations of plant communities caused by ecosystem-level factors. The analysis of the Late Pennsylvanian vegetation cover in the Donets Basin and the Northern Caucasus indicates that the different landscape and ecological conditions in different tectono-sedimentary basins determined the different types of vegetation cover differentiation, dynamics of ecological niches and diverse phytocoenotic processes. The dynamics of ecological niches and phytocoenotic processes in plant communities under conditions of different types of vegetation cover differentiation controlled the floristic composition of communities, which is reflected in stratigraphic ranges of key and characteristic taxa of macrofloral zones.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2026. 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 National Academy of Sciences of Ukraine, 2026. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Citation: Boyarina N.I. 2026. Analysis of the Upper Pennsylvanian phytazonal units of the Donets Basin and the Northern Caucasus using the ecostratigraphic approach. 2026. *Geologičnij žurnal*, 1 (394), 3–20. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.343227>

Ц и т у в а н н я : Бояріна Н.І. Аналіз верхньопенсильванських фітозональних підрозділів Донецького басейну та Північного Кавказу із застосуванням екостратиграфічного підходу. *Геологічний журнал*. 2026. № 1 (394). С. 3–20. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.343227>

## Introduction

Ecostratigraphy is regarded as 'ecosystem stratigraphy' that relies on the connection between the evolution of the organic world and geological processes controlling the development of the biosphere as an ecosystem and reveals the relationships between the palaeocommunities of biotic groups and biostratigraphical zones (Martinsson, 1973; Krassilov et al., 1985). The ecostratigraphic studies focus on identifying the links between biotic evolution and environmental changes to determine the specific events in the development of ecosystems and their interregional correlations (Martinsson, 1973, 1980; Krassilov, 1978; Boucot, 1984; Margalef, 1986). The basis for the correlation of ecosystem events (changes) is such factors as eustatic fluctuations, orogenic processes and climatic changes, which combine evolutionary and ecological changes. The close relationship between the evolution of biotic communities and the sequence of ecological changes allows the use of ecological community analysis for more detailed biostratigraphy and the understanding of discrepancies in the dating and correlation of biostratons (Krassilov, 1977; Brenner, McHargue, 1988; Gladenkov, 1990; Olóriz et al., 1996, 2012). In this context, an important aspect of ecostratigraphic research is the reflection of the sequence of biostratons in the section as the stages (phases) of development in natural complexes (ecosystems) and the boundaries of biostratons as the transformation boundaries of ecosystems under the influence of external and internal factors in the geological past (Krassilov, 1970, 1977; Martinsson, 1973; Meyen, 1989).

The identification and analysis of palaeoecosystem changes at various hierarchical levels build on the reconstruction of palaeocommunities and the study of their dynamics. For ecostratigraphic studies of continental deposits with plant fossils, it was used the plant communities identified by traditional phytosociological methods according to plant genera and species, as well as the palaeoecological interpretations of these communities (Retallack, 1978).

Palaeophytocoenotic studies of the Late Pennsylvanian plant communities, carried out by the author in recent years in the Donets Basin (Boyarina, 2022a, 2023, 2024) and the Northern Caucasus (Boyarina, Kovalenko, 2023), allowed the analysis of the macrofloral zones in an ecostratigraphic aspect in this study. The ecostratigraphic analysis of the

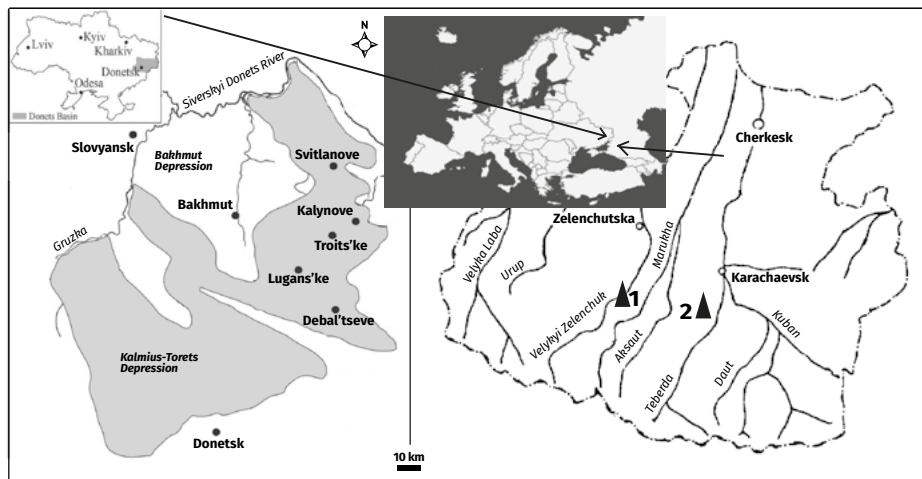
macrofloral zones was performed to reveal the features of vegetation development in different tectono-sedimentary basins.

Conducting such studies is significant for understanding the possible reasons of age inconsistencies of the boundaries of the some Upper Pennsylvanian macrofloral zones in the Donets Basin with paralic settings and the west European intramontane basins of the Variscan belt. The age inconsistencies were determined on the basis of radioisotope-dated zone boundaries in European basins (Knight, Wagner, 2014; Opluštil et al., 2016; Merino-Tomé et al., 2017; Knight et al., 2023) and chronostratigraphic calibration of cyclostratigraphic constructions of the Upper Pennsylvanian deposits in the Donets Basin (Davydov et al., 2010). The diachronicity of the boundaries of floral zones is due to the different stratigraphic ranges of some key taxa in different basins that are considered as a consequence of provincialism and migration time lag (Opluštil et al., 2021). To identify the factors that caused different taxon ranges, it is essential to analyse vegetation development under changing environmental conditions in various basins.

This study analyses the spatial structure and composition of vegetation in the time intervals of the Upper Pennsylvanian macrofloral zones in the Donets Basin with paralic settings and the North Caucasus with intramontane fluvio-lacustrine settings and reveals the developmental features of vegetation cover in these two basins of different tectono-sedimentary types.

## Geological and facies setting

The Donets Basin and the Northern Caucasus (Fig. 1) in the Pennsylvanian were within the same floristic province of the Euramerican region and were located in its eastern part (Meyen, 1987). At the same time, these two basins represent different sedimentary types. The Donets Basin is the southeastern part of the Pripyat-Dnipro-Donets intracratonic rift system or the system of avlako-genic basins (Khayin, Mikhailov, 1985; Yakushova et al., 1988; Stovba, Stephenson, 1999). The Upper Pennsylvanian deposits of the Donets Basin, with a thickness of more than 2700 m, are post-rift paralic sedimentary strata that are composed of intercalated shallow marine, swamp, lake, delta, floodplain and channel facies (Guidebook..., 1975; Chekunov, 1994; Stovba et al., 1996; Poletaev et al., 2011). In the Northern Caucasus, the areas of sediment accumulation in the Late Pennsylvanian were grabens or



**Fig. 1.** Geological map of distribution of the Upper Pennsylvanian deposits in the Donets Basin (modified from the materials of State regional geological enterprise “Donetskgeology”, 1985) and the map of the Northern Caucasus (Karachay-Cherkesk Republic) with the localities of the Late Pennsylvanian plant fossils: 1 – Zelenchuk area (basin of the Velykyi Zelenchuk River); 2 – Teberda area (basin of the Teberda River)

semi-grabens within the continental orogenic belt, as well as the foothills of the orogenic mountain ranges (Adamia et al., 1987; Yanev, Adamia, 2010). Under the conditions of the intramontane basin, the lacustrine, fluvial and proluvial deposits were formed with thicknesses ranging from 150–200 m in the Velykyi Zelenchuk River valley to 400 m in the Teberda River valley (Belov, Kizevalter, 1962; Lunev, Reznikov, 1968; Novik, 1978; Shchegolev, 1979).

## Materials and methods

The floristic analysis of the Upper Pennsylvanian macrofloral zones was conducted based on the study of collections of the fossil flora from the Donets Basin and the Northern Caucasus, which were collected in previous years by O.K. Shchegolev and the author of the present paper. The collections are stored at the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine under numbers NMNH PC 2216, IGS-OKS1 and IGS-OKS-NIB1. The flora description (Shchegolev, 1985, 1991; Boyarina, 1994, 2010, 2022b) and the classification of plant communities of the Donets Basin (Boyarina, 2022a, 2023, 2024), as well as the description of the flora and vegetation of the Northern Caucasus (Shchegolev, 1979; Boyarina, Kovalenko, 2023) were used for the ecostratigraphic studies.

The macrofloral zones of the Donets Basin (Boyarina, 2016) and the Northern Caucasus, which are described for the first time in the present paper, are identified on the basis of the stratigraphic distribution of key taxa of the west European macrofloral biozones (Wagner, 1984; Cleal, 1991; Wagner, Álvarez-Vázquez, 2010). To reveal the phytocoenotic and ecological-landscape features of the vegetation in the two regions, the description of the zones is supplemented by

characteristic taxa that appear for the first time or have the abundant distribution within the zones of each region.

To compare the macrofloral zones of the Donets Basin and the Northern Caucasus in an ecostratigraphic aspect, the phytocoenotic and ecological-landscape affiliations of zone key and characteristic taxa were identified. The phytocoenotic affiliation indicates the type of plant communities that included the key and characteristic species of zones. The ecological and landscape affiliations indicate the type of a landscape, within which the plant communities were distributed.

Based on the palaeophytocoenotic and palaeoecological characteristics of the key and characteristic taxa of macrofloral zones, the correspondence of the time intervals of macrofloral zones to the stages of vegetation cover development was established. The stage (phase) of vegetation cover development is considered as the time interval of the spread or dominance of plant communities with a certain species composition within certain landscape types. The stages are characterised by phytocoenotic processes, which are identified as phytocoenogenetic transformations, exodynamic progressive and regressive changes in plant communities. Phytocoenogenetic transformations of palaeophytocoenoses were manifested in the formation of plant communities representing new syntaxa (Sukachev, 1942). Exodynamic changes are traditionally considered to be changes caused by external factors such as climate, relief, soils and water regime (Sukachev, 1928; Shennikov, 1964), while the increases or decreases in the species composition of communities in the absence of new dominants are identified as the progressive or regressive changes in plant communities without the formation of new syntaxa.

## Floristic, phytocoenotic and ecological-landscape characteristics of the Upper Pennsylvanian macrofloral zones of the Donets Basin and the Northern Caucasus

### The Donets Basin

Five macrofloral zones have been identified in the Upper Pennsylvanian deposits of the Donets Basin using palaeobotanical criteria of phytozones of the west European Stephanian Stage (Boyarina, 2016). The zone boundaries are aligned with the limestone marker beds overlapping coal seams that are the framework for intraregional correlation of sedimentary rocks in the Donets Basin. In this paper, the floristic criteria of the macrofloral zones are supplemented by the data about phytocoenotic and ecological-landscape affiliations of the key and characteristic taxa (Fig. 2) in line with the palaeophytocoenotic study and classification of the Late Pennsylvanian palaeophytocoenoses of the Donets Basin (Boyarina, 2023, 2024), as well as the time intervals of macrofloral zones are correlated with glacioeustatic sea-level changes (Eros et al., 2012) and the Late Pennsylvanian glacial and deglacial intervals (Montañez, Poulsen, 2013; Montañez, 2022).

#### ***Odontopteris cantabrica* Zone ( $n_1$ - $N_2$ - $O_1$ )**

The lower boundary of the zone is drawn at the level of the  $n_1$  coal seam under the  $N_2$  limestone on the basis of the appearance of key taxa of *Odontopteris cantabrica* Wagner, *Alethopteris bohémica* Franke and the disappearance of *Mariopteris nervosa* (Brongniart) Zeiller (see Fig. 2). The appearance of *Sphenophyllum oblongifolium* (Germar et Kaulfuss) Unger, *Crenulopteris lamuriana* (Heer) Wagner and *Sphenopteris rossica* Zalesky (Shchegolev, 1991) in the middle and upper parts of the zone and the change of the late Westphalian flora by the early Stephanian flora above the  $n_3^1$  coal seam (marker horizon  $n_3^1$ - $N_5$ ) (Shchegolev, 1975; Shchegolev, Kozitskaya, 1975) were the basis for subdivision of the zone into two subzones, *Alethopteris bohémica* and *Sphenopteris rossica*.

The plant fossils of key species were found in the lacustrine mudstones, indicating that these plants belonged to the calamitalean-fern-pteridosperm communities of coastal lowlands. The zone interval almost completely corresponds to the long-term period of relatively

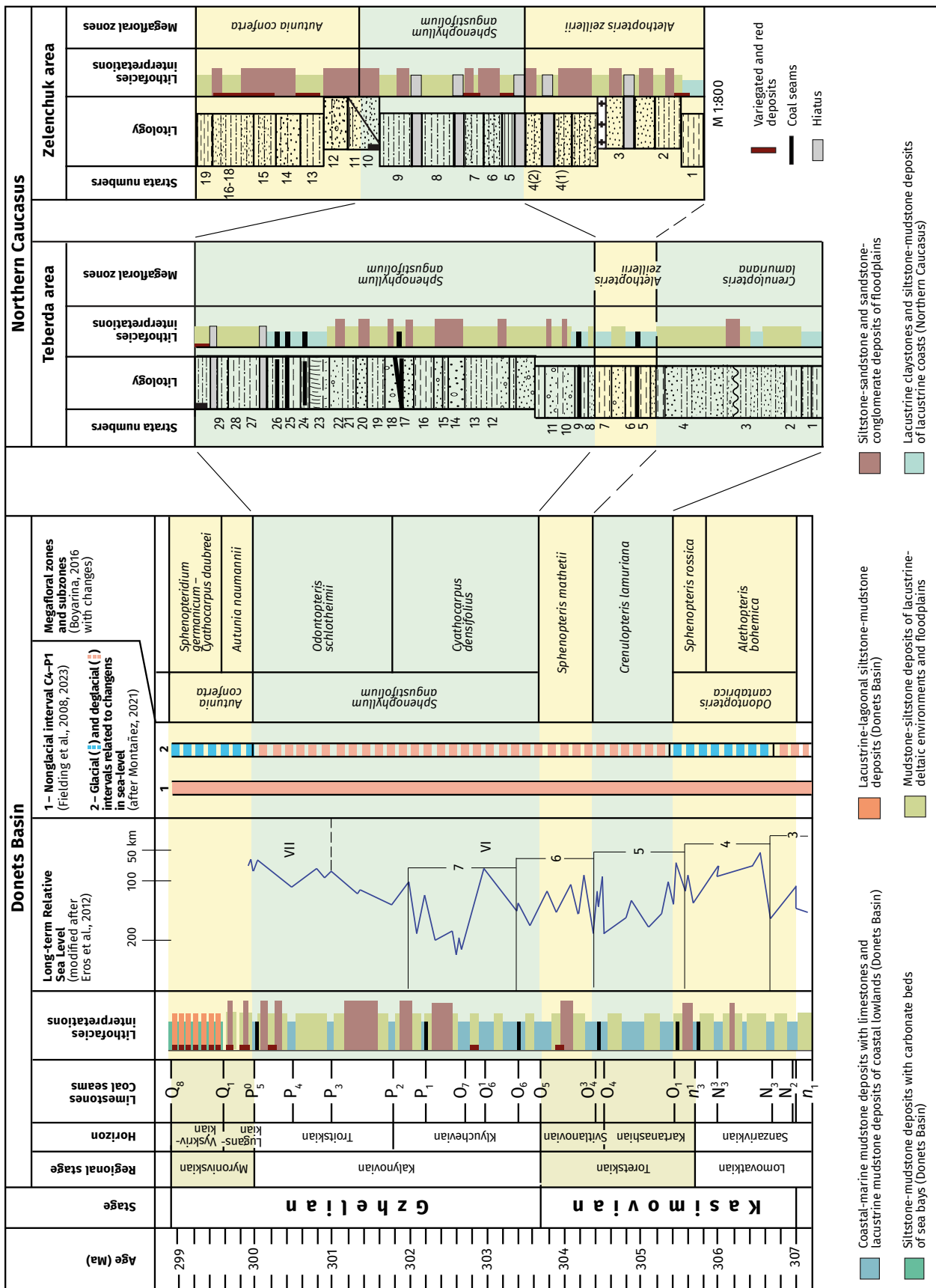
stable lower sea level (Eros et al., 2012; Boyarina, 2023), which is comparable to the earliest Kasimovian glacial interval (Montañez, Poulsen, 2013; Montañez, 2022). According to available floristic data, the wetland lycopsid-dominated forests of coastal habitats were significantly reduced in the late Lomovatkian (Fissunencko 1975, 1991, 2000) corresponding to the time interval of the lower subzone. The onset of the formation of new palaeophytocoenoses of the wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests within coastal lowlands have been traced from the beginning of the Toretskian ( $n_3^1$  -  $O_1$ ). This time interval corresponds to the *Sphenopteris rossica* Subzone and coincides with the end of the long-term period of relatively stable lower sea level (final period of the glacial interval), which is characterised by frequent sea level fluctuations (Fig. 3).

#### ***Crenulopteris lamuriana* Zone ( $O_1$ - $O_4^3$ )**

The base of the *Crenulopteris lamuriana* Zone is established by the  $O_1$  limestone (see Fig. 2). This level is characterised by the first appearance of *Nemejcopteris feminaeformis* (Schlotheim) Barthel and the disappearance of *Macroneuropteris scheuchzeri* (Hoffmann) Cleal, Shute & Zoderow. Above the  $O_1$  limestone the common occurrence of *Cyathocarpus arboreus* (Sternberg) Weiss and the increase in abundance of *Crenulopteris lamuriana* were revealed. The additional criteria of the zone are the common occurrence of *Acitheca polymorpha* (Brongniart) Schimper in the upper part of the zone and the presence of *Sphenopteris rossica* and *Sphenophyllum oblongifolium* (Shchegolev, 1985).

The listed key and characteristic taxa of ferns belonged to the calamitalean-fern-pteridosperm communities of coastal lowlands except for the *Acitheca polymorpha* ferns, which were also part of the lycopsid-fern communities of deltaic plains. The time interval of the zone was characterised by the dominance of the wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests of the *Neuropterido ovatae*-*Crenulopteridetalia lamuriana* order within coastal lowlands with the prevailing ferns *Crenulopteris lamuriana* and pteridosperms *Neuropteris ovata*. This wetland vegetation of coastal lowlands was widespread during the early phase (early Toretskian) of the long-term period of relatively stable higher sea level at the beginning of the late Kasimovian-early-middle Gzhelian deglacial interval (see Fig. 3).





**Fig. 3.** Correlation of the macrofloral zones of the Donets Basin with glacioeustatic sea-level changes during the Late Pennsylvanian glacial and deglacial intervals and the comparison of lithological and facies sequences in the sections of the macrofloral zones of the Donets Basin and the Northern Caucasus

### ***Sphenopteris mathetii* (= *Alethopteris zeillerii*) Zone ( $O_4^3-O_5$ )**

In this study the lower boundary of the *Sphenopteris mathetii* Zone, which is analogous to the west European *Alethopteris zeillerii* Zone, is placed at the level of the  $O_4^3$  limestone with the underlying  $o_2^1$  coal seam based on the appearance of *Sphenopteris mathetii* Zeiller between interlayers of the  $o_2^1$  coal seam (Shchegolev, 1985). The first occurrences at the upper part of the zone have the key taxa *Sphenophyllum longifolium* (Germar) Geinitz and *Sphenophyllum thonii* subsp. *nanum* Shchegolev. The zone is also characterised by the appearance of *Cyathocarpus lepidorachis* (Brongniart) Mosbrugger, "*Pecopteris*" *bredovii* Germar, "*Pecopteris*" *potonieii* Nemejc, *Diplazites unitus* (Brongniart) Cleal, the common occurrence of *Cyathocarpus hemitelioides* (Brongniart) Mosbrugger, *Sphenophyllum amadokense* Zakessky, *S. verticillatum* (Schlotheim) Zeiller, as well as the presence of *Acitheca polymorpha* and *Neuropteris ovata* Hoffmann (see Fig. 2).

The abundance plant remains of a diverse species composition were mainly found in lacustrine mudstones that indicate about wide spreading of the calamitalean-fern-pteridosperm communities of coastal lowlands. These plant communities belonged to the wetland forests of the same plant order as and in the time interval of the previous zone, namely the *Neuropterido ovatae-Crenulopteridetalia lamuriana* order (Boyarina, 2023). The forests of coastal lowlands continued to include the dominant ferns *Crenulopteris lamuriana* and pteridosperms *Neuropteris ovata*, as well as the ferns *Acitheca polymorpha*, *Sphenopteris rossica*, "*Pecopteris*" *bredovii*, and were supplemented by the ferns *Sphenopteris mathetii*, *Cyathocarpus hemitelioides*, *C. lepidorachis*, "*Pecopteris*" *potonieii*, *Diplazites unitus* and the sphenophylls *Sphenophyllum longifolium*, *S. thonii* subsp. *nanum* and *S. amadokense* Zalesky. The increase in the diversity of the forests of the same order occurred during the long-term period of relatively stable higher sea level with frequent sea level fluctuations during the late Kasimovian phase of the late Kasimovian-early-middle Gzhelian deglacial interval (see Fig. 3). Frequent sea level changes, i.e. transgressive-regressive cycles (Eros et al., 2012), led to landscape changes accompanied by the expansion of coastal lowlands with humid climatic and edaphic conditions in the early phase of a transgression, from the middle to late low sea level, during each trans-

gressive-regressive cycle (cyclotheme) (DiMichele, 2014). These conditions caused the expansion of the wetland forests with a richer species composition, but no change in dominants.

### ***Sphenophyllum angustifolium* Zone ( $O_5-P_5^0$ )**

The base of the zone is established by the  $O_5$  limestone with the underlying  $o_2^4$  coal seam, above which the first occurrence has the index taxon. The main characteristics of the zone are the presence of *Sphenophyllum thonii* subsp. *nanum* and the appearance of *Sphenophyllum thonii* subsp. *thonii* Shchegolev, the appearance below the  $O_5$  limestone and the abundance occurrence in the lower part of the zone of *Cyathocarpus densifolius* (Goepfert) Šimůnek et Ploch, the appearance in the middle part and the abundance occurrence in the upper part of the zone of *Odontopteris schlotheimii*, the abundance occurrence of *Sphenophyllum longifolium*, and the appearance of *Pseudomariopteris busquetii* (Zeiller) Danzé-Corsin, "*Pecopteris*" *jongmansii* Wagner, "*Pecopteris*" *platonii* Grand'Eury and also the endemic ferns of "*Pecopteris*" *mironovana* Zalesky et Tschirkova (Shchegolev, 1985). The zone is subdivided into two subzones, namely *Cyathocarpus densifolius* ( $O_5-P_2$ ) and *Odontopteris schlotheimii* ( $P_2-P_5^0$ ), according to the abundance occurrence of index species.

The time interval of the *Sphenophyllum angustifolium* Zone corresponds to two long-term periods of relatively stable higher and lower sea levels (Eros et al., 2012). The formation of deposits of the lower *Cyathocarpus densifolius* Subzone took place during the early Gzhelian period of relatively stable higher sea level with infrequent transgressive-regressive cycles during the late Kasimovian-early-middle Gzhelian deglacial interval (see Fig. 3). At that time, the vegetation cover was dominated by the wetland calamitalean-fern forests of coastal lowlands of the *Calamito sukowii-Cyathocarpetalia densifoliae* order including the dominant ferns *Cyathocarpus densifolius* and also the ferns *Cyathocarpus arboreus*, *Diplazites unitus*, and *Nemejcopteris feminaeformis*. The sedimentary rocks of the upper *Odontopteris schlotheimii* Subzone were formed during the middle Gzhelian period of falling sea level at the end of the same deglacial interval. In this time interval the reduction of coastal lowlands and the expansion of deltaic plains and floodplains occurred, as evidenced by the lithological and facies compositions of the deposits. The vegetation of the zone interval was dominated

by the calamitalean-fern and lycopsid-pteridosperm forests of the *Subsigillario–Odontopteridetalia schlotheimii* order on deltaic plains with the predominant pteridosperms *Odontopteris schlotheimii* Brongniart and the common pteridosperms *Neuropteris crassinervis* Shchogolev ms. as well as the ferns “*Pecopteris*” *mirnovana* and “*Pecopteris*” *platonii* Grand'Eury. These processes are consistent with the affiliation of the key taxa of the lower subzone to the dominant plant communities of coastal lowland forests, and the key taxa of the upper subzone to the dominant plant communities of deltaic plain forests.

#### ***Autunia conferta* Zone (P<sub>5</sub><sup>0</sup>–Q<sub>8</sub>)**

The lower boundary of the *Autunia conferta* Zone is marked by the first occurrence of the index taxon and other callipterid pteridosperms of *Autunia naumannii* (Gutbier) Kerp, *Lodevia nicklesii* (Zeiller) Haubold et Kerp, *L. suberosa* (Sterzel) Haubold et Kerp above the P<sub>5</sub><sup>0</sup> limestone (Shchogolev, 1960; Boyarina, 2010) (see Fig. 2). The zone is also characterised by the appearance of *Odontopteris lingulata* Goepfert and *Sphenopteridium germanicum* (Weiss) Kerp et DiMichele and the abundance occurrence of *Cyathocarpus daubreei* (Zeiller) De Stefani. The zone was subdivided into two subzones according to the occurrence of its index taxa: *Autunia naumannii* (P<sub>5</sub><sup>0</sup>–Q<sub>1</sub>) and *Sphenopteridium germanicum–Cyathocarpus daubreei* (Q<sub>1</sub>–Q<sub>8</sub>).

According to lithological and facies characteristics, the formation of deposits of this zone took place under conditions of further falling sea level (Berchenko et al., 1993; Poletaev et al., 2011) at the beginning of late Paleozoic glaciation (Fielding et al., 2008; Montañez, Poulsen, 2013; Montañez, 2022). The falling sea level during the glacial interval led to the shallowing and gradual isolation of the marine basin. In the time interval of the lower *Autunia naumannii* Subzone (P<sub>5</sub><sup>0</sup>–Q<sub>1</sub>), the seasonally dry pteridosperm woodlands of floodplains and river valley slopes of the *Autunietalia conferto–naumannii* order predominated. They included the key and characteristic taxa of the pteridosperms *Autunia conferta*, *A. naumannii* (Gutbier) Kerp, *Lodevia nicklesii* (Zeiller) Haubold et Kerp, *L. luganica*, *L. suberosa* (Sterzel) Haubold et Kerp, *Dichophyllum cuneatum*. During the time interval of the upper *Sphenopteridium germanicum–Cyathocarpus daubreei* Subzone, the plant communities of the wetland calamitalean-fern-pteridosperm woodlands of the *Odontopterido schlotheimii–Cyathocarpetalia daubreei*

order on coastal lowlands and the seasonally dry fern-pteridosperm woodlands of the *Sphenopteridio germanici–Cyathocarpetalia daubreei* order on lagoon plains were widespread. These communities included the characteristic taxa of the ferns *Cyathocarpus daubreei*, *C. arboreus*, “*Pecopteris*” *jongmansii* and the pteridosperms *Sphenopteridium germanicum*.

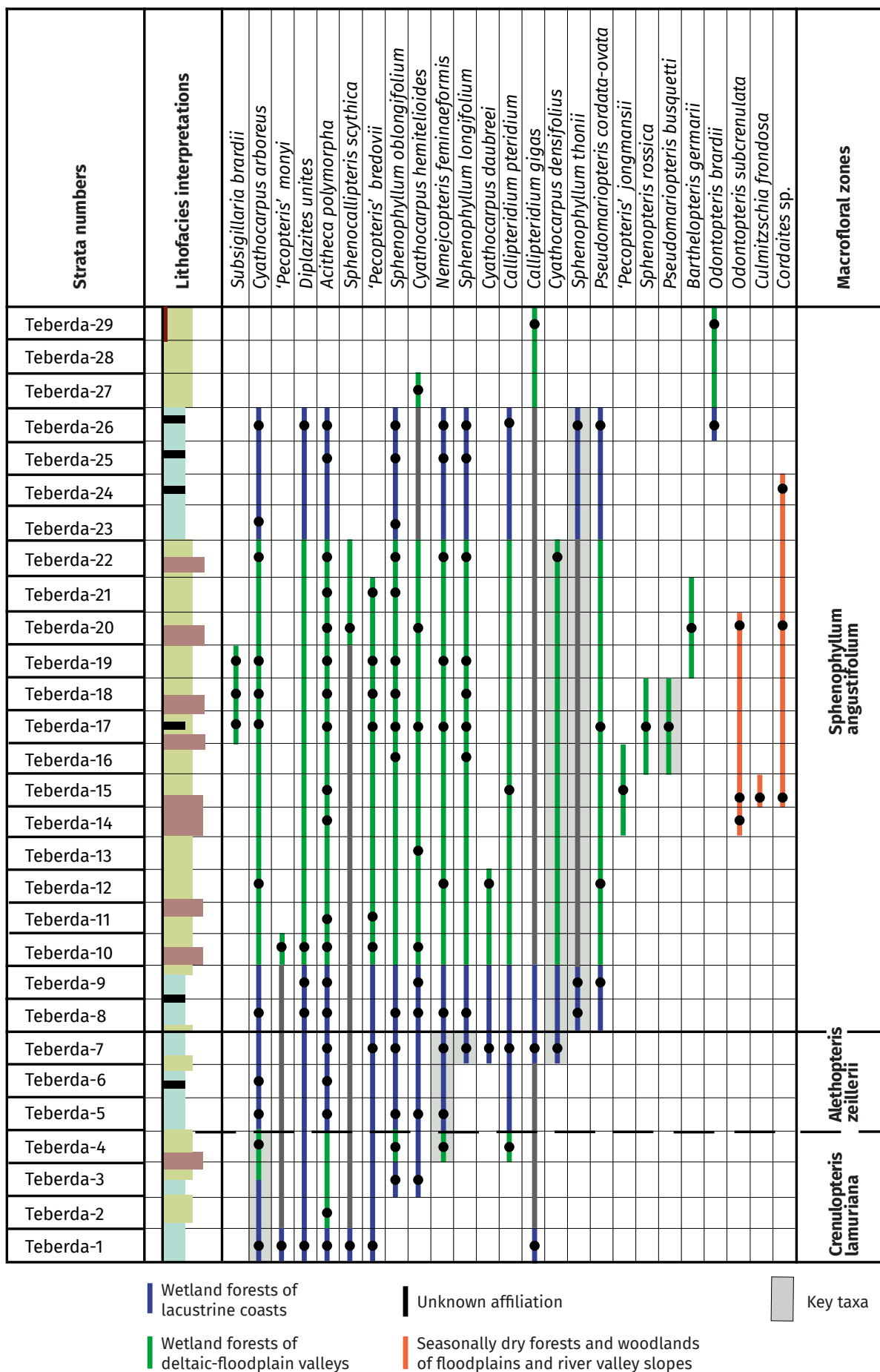
#### **The Northern Caucasus**

The Upper Pennsylvanian plant-bearing beds of the Zelenchuk and Teberda areas of the Northern Caucasus were comparable to four macrofloral zones of the Stephanian Stage of the regional west European stratigraphic scale according to the key taxa distribution (Boyarina, Kovalenko, 2023). The deposits of the lower *Odontopteris cantabrica* Zone of the Stephanian Stage have not been identified in the Caucasus that may be a consequence of a sedimentary hiatus at the beginning of the Stephanian or erosion. Below is the description of the identified macrofloral zones on the basis of the stratigraphic distribution of the fossil floras (Shchegolev, 1979; Boyarina, Kovalenko, 2023). The floristic criteria of zones were supplemented by the ecological and phytocoenotic characteristics of their key and characteristic taxa, which were established as a result of palaeophytocoenotic analysis of fossil plant assemblages in the Northern Caucasus (Boyarina, Kovalenko, 2023).

#### ***Crenulopteris lamuriana* Zone (Teberda 1–4)**

The zone corresponds to the plant-bearing beds 1–4 that include the key taxa of the ferns *Nemajopteris feminaeformis* and *Cyathocarpus arboreus* (Fig. 4). This interval is also characterised by the presence of the ferns *Cyathocarpus hemitelioides*, *Acithea polymorpha*, “*Pecopteris*” *bredovii*, “*Pecopteris*” *monyi* Zeiller, *Diplazites unitus* and the pteridosperms *Sphenocallipteris scythica* (Zallessky) Kryshstofovich et Novik, *Callipteridium gigas* (Gutbier) Weiss and *C. pteridium* (Schlotheim) Zeiller. The fossils *Crenulopteris lamuriana* are not found in the Northern Caucasus.

The plant remains of the listed species from lacustrine and deltaic deposits indicate about the similar species composition of the plant communities formed the wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests of lacustrine coasts and deltaic valleys, in which the same ferns *Acithea polymorpha* and *Cyathocarpus arboreus* were widespread.



**Fig. 4.** Stratigraphical ranges (data of O.K. Shchegolev (1979) with additions of the author) and the phytocoenotic and landscape affiliation of the key and characteristic taxa of the Upper Pennsylvanian macrofloral zones of the Teberda area. Legend of lithofacies see Fig. 3

### ***Alethopteris zeilleri* Zone**

(Teberda 5–7, Zelenchuk 1–4)

In the Teberda area, the zone comprises the plant-bearing beds 5–7, including the key taxon *Sphenophyllum longifolium* in the upper part of the zone and the stratigraphically important ferns *Acithea polymorpha*, *Cyathocarpus arboreus*, *C. hemitelioides*, "*Pecopteris*" *bredovii*, *Nemejcopteris feminaeformis* and pteridosperms *Callipteridium pteridium* (Schlotheim) Zeiller, as well as the ferns *Cyathocarpus densifolius* in the plant-bearing bed 7 (see Fig. 4). The lower boundary of the zone is conditionally delineated by lithological and facies criteria at the base of the plant-bearing bed 5. The above-mentioned fossil remains were found in lacustrine grey unlayered clay shales and siltstones. The plants of named species formed part of the calamitalean-fern-pteridosperm communities of lacustrine coasts.

This zone in the Zelenchuk area is comprised of the plant-bearing beds 1–4, and contains *Sphenophyllum longifolium* (Germar) Gutbier in the lower part and *Sphenophyllum thonii* in the upper part of zone interval (Fig. 5). The characteristic taxa of the zone are the ferns *Cyathocarpus arboreus*, *C. hemitelioides*, *Acithea polymorpha* and the pteridosperms *Odontopteris brardii* (Brongniart) Brongniart. The fossil remains of sphenophylls were found in lacustrine grey clay shales and lacustrine-deltaic siltstones, while ferns and pteridosperms are common in deltaic-floodplain siltstones and sandstones. The plants of key and characteristic taxa belonged to the calamitalean-fern communities of lacustrine coasts and the lycopsid-calamitalean-fern-pteridosperm communities of deltaic-floodplain valleys.

The species composition of plant fossil assemblages from lacustrine, deltaic and floodplain facies suggests that the vegetation cover in the Northern Caucasus consisted of the wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests of lacustrine coasts and the lycopsid-calamitalean-fern-pteridosperm forests of deltaic-floodplain valleys of predominantly similar species composition with slight differences. The plant communities of the lacustrine coasts in the Teberda area, in particular, had a richer species composition of ferns with the same dominant *Cyathocarpus arboreus* and *Acithea polymorpha* as in the time interval of the preceding zone and also included those ferns that were part of the deltaic-floodplain communities in the Zelenchuk area.

However, the pteridosperm composition was different in these two areas. In general, the vegetation cover of lacustrine coasts and deltaic-floodplain valleys, which included as before the ferns *Cyathocarpus arboreus*, *Nemejcopteris feminaeformis*, *Acithea polymorpha*, "*Pecopteris*" *bredovii* and the pteridosperms *Callipteridium pteridium*, *C. gigas*, was supplemented by the ferns *Cyathocarpus hemitelioides*, *C. daubreei*, *C. densifolius*, *Sphenopteris elaverica* Shchegolev, the pteridosperms *Odontopteris brardii*, *Dicksonites pluckenetii* (Schlotheim) Sterzel, *Pseudomariopteris cordato-ovata*, and the sphenophylls *Sphenophyllum longifolium* and *S. thonii*.

### ***Sphenophyllum angustifolium* Zone**

(Teberda 8–29, Zelenchuk 5–10)

The upper part of the Upper Pennsylvanian in the Teberda River basin with the plant-bearing beds 8–29 have been assigned to the *Sphenophyllum angustifolium* Zone based on the presence of the key taxa, such as the sphenophylls *Sphenophyllum thonii* Mahr, the pteridosperms *Pseudomariopteris busquetii* (Zeiller) Danz -Corsin, emend. Krings et Kerp and the ferns *Cyathocarpus densifolius* (see Fig. 4). In addition, the characteristic taxa of the zone in the Teberda area are the ferns *Cyathocarpus arboreus*, *C. hemitelioides*, *Acithea polymorpha*, and "*Pecopteris*" *bredovii*, which continued to dominate in vegetation cover as in previous times, as well as the pteridosperms *Pseudomariopteris cordato-ovata* (Weiss) Gillespie et al., *Callipteridium gigas*, *C. pteridium*, and the lycopods *Subsigillaria brardii* (Brongniart) Weiss emend. Shchegolev. Plant remains of mainly the same species composition were found both in lacustrine shales and in mudstone and siltstone deposits of deltaic and floodplain settings, except for the lycopods and some pteridosperms, which occur only in deltaic and floodplain deposits. These floristic and facies data indicate that the plants of key and characteristic taxa belonged to the calamitalean-fern-pteridosperm communities of lacustrine coasts and the lycopsid-calamitalean-fern-pteridosperm communities of deltaic-floodplain valleys.

In the Zelenchuk area, the zone comprises the plant-bearing beds 5–10, which include *Sphenophyllum angustifolium* (Germar) Goepfert in the bed 5 and *Sphenophyllum thonii*. These beds are characterised by the diverse flora, namely the ferns *Acithea polymorpha*, *Cyathocarpus arboreus*, *C. candolleanus*



### ***Autunia conferta* Zone** (Zelenchuk 11–19)

The *Autunia conferta* Zone is defined based on the appearance of an index species. The pteridosperms *Autunia conferta* and other characteristic pteridosperms *Dichophyllum flabelliferum* (Weiss) Kerp et Haubold and *Sphenopteridium germanicum* were found in floodplain fine-grained sandstones (see Fig. 5). These pteridosperms belonged to the communities of the seasonally dry pteridosperm-conifer forests of floodplains and river valley slopes. In addition, typical for the zone are also the diverse sphenopsids, ferns, and pteridosperms that grown within deltaic-floodplain valleys. The time interval of this zone is characterised by the appearance of new communities of the seasonally dry pteridosperm forests within floodplains as well as the spread of the same wetland lycopsid-calamitalean-fern-pteridosperm forests with the same dominants within deltaic-floodplain valleys as in the previous time interval.

## **Comparative palaeophytocoenotic analysis of Late Pennsylvanian vegetation cover in the Donets Basin and the Northern Caucasus**

The vegetation analysis was carried out based on the floristic and syntaxonomic compositions of the vegetation cover of the Donets Basin established by the author as a result of the classification of plant communities using the Braun-Blanquet method (Boyarina, 2023) and the taxonomic composition of plant communities in the Northern Caucasus basin (Boyarina, Kovalenko, 2023). The composition of the Late Pennsylvanian vegetation cover in each basin had distinctive features. The plant communities of the Donets Basin during different time intervals of the Late Pennsylvanian belonged to wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests and calamitalean-fern woodlands, and also seasonally dry fern-pteridosperm woodlands of coastal lowlands; wetland lycopsid-calamitalean-fern-pteridosperm forests and calamitalean-fern-pteridosperm woodlands of delta plains; seasonally dry fern-pteridosperm woodlands of floodplains, and cordaitalean and coniferous woodlands of river valley slopes. According to the refined ecological and landscape interpretations in the present study, the plant communities of the Northern Caucasus were part of the wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests of lacustrine coasts, wetland lycopsid-calamitalean-fern-pteridosperm forests

of deltaic-floodplain valleys, and seasonally dry pteridosperm and coniferous forests or woodlands of floodplains and river valley slopes.

The palaeophytocoenotic and palaeoecological characteristics of the plant communities discussed above for five time intervals of macrofloral zones provide an opportunity to identify the features of the spatial structure and development of the Late Pennsylvanian vegetation cover in sedimentary basins of different types.

The vegetation cover in the Donets Basin with paralic settings was characterised by the changes in the dominance of plant communities that were associated with the landscape changes as a result of glacioeustatic sea level fluctuations. The differences in the composition of plant communities of different landscape types point to a clearly expressed spatial differentiation of vegetation cover in accordance with the landscape differentiation, namely the vegetation differentiation into the plant communities of coastal lowlands, deltaic and floodplain plains and river valley slopes. And thus, the differentiation of vegetation cover in the Donets Basin reflects the spread of the plant communities of the certain syntaxonomic type with a characteristic species composition and dominants across extensive low-relief terrains. The comparison of the time intervals of macrofloral zones with glacioeustatic sea-level changes (see Fig. 3) and the conducted analysis of plant communities show that changes of the periods of relative sea level with characteristic eustatic features (frequent or infrequent fluctuations) and climatic changes led to the changes in the spatial distribution and dominance of different types of landscapes with their characteristic plant communities. The expansion of certain types of landscapes was accompanied by the expansion of existing ecological niches and the emergence of new ecological niches. The latter played a key role in the evolution and distribution of plants and palaeophytocoenoses (Odum, 1975; DiMichele, Hook, 1992). The intensification of evolutionary changes of vegetation occurred during the periods with frequent eustatic fluctuations, which took place in the time intervals of the *Odonopteris cantabrica* Zone and the *Sphenopteris mathetii* (= *Alethopteris zeillerii*) Zone (see Fig. 3). In contrast, the Gzhelian stepwise changes in dominant landscapes from coastal lowlands and delta plains to river valleys and lagoonal plains occurred at the transition period from the late Kasimovian–early-middle Gzhelian deglacial interval to the late

Paleozoic glaciation under condition of a falling sea level. These landscape changes were accompanied by the changes in the dominance of habitat-specific plant communities that are reflected by the subzones of the *Sphenophyllum angustifolium* Zone and the *Autunia conferta* Zone.

The vegetation cover in the Northern Caucasus with intramontane fluvio-lacustrine settings, overall consisting of the plant communities of lacustrine coasts and deltaic-floodplain valleys, had differences in different areas. In the Teberda area, wetland forest communities were widespread within lacustrine coasts and deltaic-floodplain valleys, whereas in the Zelenchuk area, wetland forests of deltaic-floodplain valleys prevailed. The changes of landscape settings and vegetation in intramountain basins were traditionally associated with the changes of local base level driven generally by fault- and fold-related subsidence and uplift. The lithological and facies sequences of deposits, in particular the stratigraphic position of lacustrine strata with coal interlayers within certain macrofloral zones in the Teberda area, that corresponds to the position of shallow marine strata with lacustrine and swamp sediments in the same macrofloral zones in the Donbas, can signal the possible role of glacioeustatic sea-level fluctuations in the changes of the local base level of erosion (lake levels in intramontane basins) during periods of the relatively stable higher sea level in the late Kasimovian–early-middle Gzhelian deglacial interval. However, such an impact of sea-level fluctuations could be possible, provided that there was a hydrological connectivity between the local base level of these territories and the relative sea level. But either way, the changes of the local base level of erosion played a main role in the changes of vegetation cover of the Northern Caucasus. The intramountain type of the Northern Caucasus basin within the continental orogenic belt, as well as the taphonomic features and facies affiliation of plant remains of diverse taxonomic groups discovered in Teberda and Zelenchuk areas indicate a catenary organization of vegetation cover. The geobotanical studies of the catenary arrangement of soils and plant communities have shown that the sequence of soil types (catena) influences the distribution of plant communities and is controlled by the sequence of landscape conditions according to micro-relief elements from watersheds to a local base level and, consequently, landforms, soils and vegetation reflect a catenary sequence

(arrangement) from upland to lowland positions (Milne, 1935; Bushnell, 1942; Krassilov, 1972, 1977; Young, 1972). According to the lithological and facies features of deposits in the two studied basins, the landscape catenary series included lacustrine coasts, deltaic-floodplain valleys, and river valley slopes located on sloping terrains. The important aspect of this catenary series is a directional change of landscape structures along relief-related topographic and drainage gradients. The second important aspect is the mainly similar species composition of plant fossil assemblages from diverse facies (lacustrine, lacustrine-deltaic and deltaic-floodplain). This provides evidence that the plant communities of adjacent landscapes had a similar species composition and identical dominants in the intramountain basin with the catenary sequence of plant communities and the narrowly limited spatial distribution of landscape types, except in lycosids that were limited only to deltaic settings. These phytocoenotic data and the facies sequences of deposits suggest that the dynamics of landscape types for a long time was mainly accompanied by an expansion of the ranges of plant communities and the community interaction of adjacent landscapes, which led to an increase in species diversity of plant communities without changing their dominants. The species diversity and similar species composition of plant communities of adjacent landscape types (lacustrine coasts and deltaic-floodplain valleys) were most likely a manifestation of the ecotone (edge) effect. The ecotone effect is expressed in the biological diversity of plant communities formed over long periods of time in the vegetation cover of the transition zone between two adjacent ecologically different landscape types (Odum, 1975; Holland et al., 1991). High species diversity in ecotones was contributed by the emergence of new ecological niches due to their overlap (Odum, 1975). The pronounced manifestation of the ecotone effect in the development of vegetation cover was most likely facilitated by the limited spatial distribution of these landscapes within the intramountain basin. Such features of the development of plant communities of two landscape types are traced throughout the time intervals of the macrofloral zones of *Crenopteris lamuriana*, *Alethopteris zeillerii* and, especially, the *Sphenophyllum angustifolium* Zone. In addition, at this time the flora of the Northern Caucasus was also enriched by such endemic species as "*Pecopteris*" *angustissima* Shchegolev,

“*Pecopteris*” *kaucasica* Shchegolev, *Sphenoneuropteris elegans* Shchegolev, *S. brongniartii* Shchegolev, *Neuropteris teberdensis* Shchegolev (Shchegolev, 1979).

The different differentiation types and phytocoenotic processes of plant communities in the Donets Basin and the Northern Caucasus determined the dynamics of vegetation cover over the Late Pennsylvanian. In the development of vegetation cover in basins, several stages can be identified, which correspond to time intervals of macrofloral zones.

In the Donets Basin, the time interval of the *Odontopteris cantabrica* Zone corresponds to the transitional stage of the replacement of lycopod-dominated forests by fern-dominated forests within coastal lowlands. The reduction in species diversity of forests with dominant lycopods (Fissunencko, 1991) indicates regressive changes in plant communities. The vegetation changes of coal-swamp environments were associated with changes of climatic conditions in the long period of the relatively stable low sea level within the early Kasimovian glacial interval in the Donets Basin. Therefore, the lower boundary of this zone marks exodynamic regressive changes, i.e. the beginning of the gradual decline of the wetland lycopod-dominated forests.

The time interval of the *Crenulopteris lamuriana* Zone corresponds to the stage of the dominance of the wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests of the *Neuropterido ovatae-Crenulopteridetalia lamuriana* order on coastal lowlands in the Donets Basin, as well as the stage of the dominance of the wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests of lacustrine coasts and deltaic valleys with the dominant ferns *Acithea polymorpha* and *Cyathocarpus arboreus* in the Teberda area of the Northern Caucasus. The lower boundaries of the zone in both regions mark phytocoenogenetic changes in vegetation cover, namely the formation and spread of new communities of wetland forests with a similar species composition of sphenopsids and ferns, but with the different fern dominants and the different taxonomic composition of pteridosperms in each of the basins. The formation of new communities in both basins was influenced by climatic conditions at the beginning of the late Kasimovian–early-middle Gzhelian deglacial interval as well as regional ecological and landscape factors. The new plant communities in the Donets Basin were formed in conditions of the emergence of new ecological niches within

widespread coastal lowlands, while in the Northern Caucasus, the spread of new plant communities within lacustrine coasts and deltaic valleys was controlled by the presence of ecotones in vegetation cover.

The time interval of the *Alethopteris zeilleirii* (= *Sphenopteris mathetii*) Zone in both basins corresponds to the stage of the increasing species diversity of the same communities as in the time interval of the previous zone. In the Donets Basin, this is the stage of the increasing species diversity of the communities of the wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests of the *Neuropterido ovatae-Crenulopteridetalia lamuriana* order on coastal lowlands, and in the Northern Caucasus, this is the stage of the increasing species diversity of the communities of the wetland calamitalean-fern-pteridosperm forests with the dominant *Acithea polymorpha* and *Cyathocarpus arboreus* on lacustrine coasts and the lycopod-calamitalean-fern-pteridosperm forests with the same dominant ferns and the more common pteridosperms *Odontopteris brardii* on deltaic-floodplain valleys. Consequently, the vegetation cover in both basins was characterised by a predominantly similar species composition of ferns, but with different dominants and different composition of pteridosperms. The communities of deltaic-floodplain valleys in the Northern Caucasus included other and more diverse pteridosperms. The lower boundary of the zone in each of the basins marks the exodynamic progressive changes in the same palaeophytocoenoses. The increase in the species composition of ferns and sphenophylls belonging to the plant communities of coastal lowlands in the Donets Basin was associated with the periodic expansions of coastal lowlands accompanied by the emergence of new ecological niches during the late Kasimovian long period of the relatively stable high sea level with frequent sea-level fluctuations. In the Northern Caucasus, the increase in diversity of species composition of ferns, sphenophylls and pteridosperms occurred under conditions of the expansions of lacustrine coasts in the Teberda area and deltaic-floodplain valleys in the Zelenchuk area with the emergence of new ecological niches as a result of changes of local base level.

The time interval of the *Sphenophyllum angustifolium* Zone in the Donets Basin corresponds to the stage of the formation and spread of new communities with two successive substages: the early

substage of the dominance of new communities of the wetland calamitalean-fern forests of the *Calamito suckowii*-*Cyathocarpetalia densifoliae* order on coastal lowlands and the late substage of the dominance of new communities of the lycopsid-calamitalean-fern-pteridosperm forests of the *Subsigillario*-*Odontopteridetalia schlotheimii* order on deltaic plains. The lower boundary of the zone marks the phytocoenogenetic changes of palaeophytocenoses that were presented by the formation of new communities of the wetland forests of coastal lowlands and deltaic plains with new dominants. The formation of new palaeophytocenoses of these environments took place in the final phase of the late Kasimovian-early-middle Gzhelian deglacial interval, during which the period of the relatively higher sea level was replaced by the period of the falling sea level. The dominance of coastal lowlands in the first half of the time interval of the zone and deltaic plains in the second half of this interval played a decisive role in the spread of these two types of plant communities of different syntaxonomical types because the dominance of landscapes was accompanied by the expansion of existing and the emergence of new ecological niches within each of these landscape types. An important peculiarity in this regard is the fact that the ferns and sphenophylls of the zone key species were part of the plant communities of dominating coastal lowlands in the time interval of the lower *Cyathocarpus densifolius* Subzone, and pteridosperms of the zone key species belonged to the plant communities of the dominating deltaic plains in the time interval of the upper *Odontopteris schlotheimii* Subzone. In the Northern Caucasus, the time interval of the *Sphenophyllum angustifolium* Zone corresponds to the stage of the increasing species diversity of the plant communities with former dominants. The dominant ferns *Acithea polymorpha* and *Cyathocarpus arboreus* and non-dominant pteridosperms *Pseudomariopteris cordata-ovata* are known in the Teberda area. The ferns *Acithea polymorpha* and the pteridosperms *Odontopteris brardii* continued to dominate in Zelenchuk area. The lower boundary of the zone in the Northern Caucasus marks exodynamic progressive changes in paleophytocenoses. These community changes were caused by the expansion of deltaic-floodplain valleys and the emergence of new ecological niches in the Zelenchuk area. In the Teberda area, the plant communities of lacustrine coasts and

deltaic-floodplain valleys had a largely similar species composition of ferns and sphenophylls, but the composition of the pteridosperms of deltaic-floodplain communities was more diverse than the communities of lacustrine coasts. The progressive changes in plant communities of the Teberda area were most probably due to a manifestation of the ecotone effect and an overlap of ecological niches.

The time interval of the *Autunia conferta* Zone in the Donets Basin corresponds to two successive stages of vegetation development. The lower *Autunia naumannii* Subzone corresponds to the stage of the formation and spread of new communities of the seasonally dry woodlands of the *Autunietalia conferto-naumannii* order of floodplains and river valley slopes, while the upper *Sphenopteridium germanicum*-*Cyathocarpus daubreei* Subzone – the stage of the formation and dominance of new communities of the seasonally dry fern-pteridosperm woodlands of the *Odontopterido schlotheimii*-*Cyathocarpetalia daubreei* order on lagoon plains. The time interval of this zone in the Northern Caucasus corresponds to the stage, which is characterised by the formation and spread of new communities of the seasonally dry forests or woodlands including callipterid pteridosperms within floodplains and river valley slopes alongside the spread of the same communities of the wetland lycopsid-calamitalean-fern-pteridosperm forests with the previous dominant *Acithea polymorpha* and *Odontopteris brardii* in deltaic-floodplain valleys as in the previous time interval. Therefore, the lower boundaries of the zone in both regions mark the phytocoenogenetic changes of palaeophytocenoses, namely the formation and spread of new communities of the seasonally dry forests or woodlands of floodplains and river valley slopes. The wider spread of seasonally dry vegetation took place during the late Gzhelian glacial interval, which accompanied by the long-term gradual increase in aridity during the Late Pennsylvanian. However, the *Autunia conferta* Zone in the Northern Caucasus is distinguished by the more diverse flora of river landscapes, namely the presence of pteridosperms of the *Callipteridium* genus (*Callipteridium gigas*, *C. trigonum* Franke) and richer species composition of sphenophylls and ferns. This makes it possible to assume that wetter conditions were still maintained in the intramontane basin at the end of the Late Pennsylvanian.

Summarizing the above, it can be argued that the different landscape and ecological conditions in the two considered sedimentary basins determined different types of differentiation of the vegetation cover reflecting plant community distribution and developmental features of plant communities shaped by ecological niche dynamics. The vegetation cover in the Donets Basin was characterised by the spatial differentiation into plant communities in coastal lowlands, deltaic and floodplain plains, and river valley slopes in low-relief terrains and the emergence of new ecological niches under conditions of landscape expansion or change. The vegetation cover in the Northern Caucasus was marked by the catenary differentiation into plant communities of lacustrine coasts, deltaic-floodplain valleys and river valley slopes in sloping terrains with increased plant species richness as a manifestation of the ecotone effect and the emergence of new ecological niches as a result of niche overlap. The changes of landscapes occurred mainly as a consequence of glacioeustatic processes in the Donets Basin and changes in the local base level with its inherent erosion processes in the Northern Caucasus against the backdrop of global climate changes and tectonic processes within continental orogenic belts. The landscape changes had an impact on vegetation cover dynamics that are reflected in the successive stages of vegetation development with the different phytocoenotic changes of plant communities. In the Donets paralic basin with the spatial differentiation of vegetation cover, the phytocoenogenetic and exodynamic progressive changes were characteristic for plant communities. In the

Northern Caucasus intramontane basin with the catenary differentiation of vegetation cover, the exodynamic progressive changes in plant communities predominated as a manifestation of the ecotone effect.

## Conclusions

The comparative analyses of palaeophytocoenotic and landscape data of Late Pennsylvanian vegetation in time interval of five macrofloral zones in the Donets Basin with paralic setting and the Northern Caucasus intramontane basin with fluvio-lacustrine environments showed that the different landscape and ecological conditions determined the developmental features of vegetation cover. The vegetation cover in different tectono-sedimentary basins was characterised by different types of differentiation reflecting plant community distribution, different features of plant community development shaped by dynamics of ecological niches and diverse phytocoenotic processes. The dynamics of ecological niches and phytocoenotic processes of plant communities under conditions of different types of vegetation cover differentiation controlled the floristic composition of communities, which is reflected in stratigraphic ranges of plant fossil taxa and phytostatigraphical zonation.

**Acknowledgements.** *This study was conducted within the framework of the budget program of the National Academy of Sciences of Ukraine (project No. 0122U001609). The author is grateful to Christopher J. Cleal and Mihai E. Popa for the comprehensive review of the manuscript and constructive comments aimed at improving the text.*

Проведено флористичні, палеофітоценотичні та палеоекологічні аналізи пізньопенсильванського рослинного покриву Донецького басейну та Північного Кавказу для часових інтервалів макрофлористичних зон з метою обґрунтування верхньопенсильванських фітозональних підрозділів у контексті палеоекосистемних змін. Рослинний покрив кожного басейну відзначався типом диференціації, який відображав розташування рослинних угруповань, та особливостями розвитку рослинних угруповань, обумовленими динамікою екологічних ніш. Рослинний покрив Донецького внутрішньократонного басейну з постріфтовою паралічною седиментацією, де значний вплив мали гляціоевстатичні зміни рівня моря, характеризувався просторовою диференціацією на угруповання прибережних низовин, дельтових і заплавної рівнин і схилів річкових долин слабореельєфних місцевостей та появою нових екологічних ніш при змінах домінування типів ландшафту. Рослинний покрив міжгірського басейну Північного Кавказу з флювіально-озерними природними середовищами, де просторовий розподіл ландшафтів формувався під впливом змін місцевого базису ерозії, контрольованого орогенічними процесами, характеризувався катенарною диференціацією на рослинні угруповання озерних узбереж, дельтово-заплавних долин і схилів річкових долин схилових місцевостей із збільшеним видовим багатством рослин як прояв екотонного ефекту та появою нових екологічних ніш у результаті перекриття ніш. Часові інтервали макрофлористичних зон скорельовані з етапами розвитку рослинного покриву, які розрізняються прогресивними або регресивними фітоценотичними змінами та фітоценогенетичними змінами рослинних угруповань, спричиненими факторами екосистемного рівня. Аналіз пізньопенсильванського рослинного покриву в кожному часовому інтервалі п'яти макрофлористичних зон Донецького басейну та Північного Кавказу свідчить, що різні ландшафтні та екологічні умови в різних тектоно-седиментаційних басейнах визначали різні типи диференціації рослинного покриву, динаміку екологічних ніш і різноманітні фітоценотичні процеси. Динаміка екологічних ніш і фітоценотичні процеси рослинних угруповань в умовах різних типів диференціації рослинного покриву контролювали флористичний склад угруповань, що відображається у стратиграфічних діапазонах ключових і характерних таксонів макрофлористичних зон.

## References

- Adamia Sh., Belov A., Kukelia M., Shavishvili I. 1987. Paleozoic tectonic development of the Caucasus and Turkey. *Prevariscan and Variscan Events in the Alpine-Mediterranean Belts*. Bratislava Alfa Publishers, pp. 23–50.
- Belov A.A., Kizevalter D.S. 1962. The main features of structure and history of the development of the Late Hercynian structural stage in the central part of the Northern Caucasus (Middle Carboniferous to Lower Triassic). *Geology of the Central and Western Caucasus*, 3, 275–314 (in Russian).
- Berchenko O.I., Boyarina N.I., Vakarchuk G.I., Vdovenko M.V., Vinichenko L.G., Gorak S.V., Grytsenko V.P., Zhikalyak M.V., Ishchenko A.A., Kiryanov V.V., Kozitskaya R.I., Kompanets G.S., Kononenko L.P., Konstantynenko L.I., Korenoy V.I., Lukin A.E., Matyushenok V.A., Nemirovskaya T.I., Neutrievskaya N.V., Nyaga V.I., Onufrishin S.F., Pogrebnyyak V.A., Poletaev V.I., Pomyanovskaya G.M., Reznikov A.I., Ryabchun L.I., Samoylyuk A.P., Skovorodnikova E.A., Ustinovsky Yu.B., Fissunen-ko O.P., Khrushchev D.P., Tsegelnyuk P.D., Shchegolev A.K. 1993. Geological history of the territory of Ukraine. Palaeozoic. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Boucot A.J. 1984. Ecostratigraphy. In: Seibold E., Meulenkamp J.D. (Eds.). *AAPG Special Publications*, 16 (119), 55–60.
- Boyarina N.I. 1994. Callipterid pteridosperms from the Early Permian of Ukraine. *Acta Palaeontologica Polonica*, 39 (1), 117–133.
- Boyarina N.I. 2010. Late Gzhelian pteridosperms with callipterid foliage of the Donets Basin, Ukraine. *Acta Palaeontologica Polonica*, 55 (2), 343–359.
- Boyarina N.I. 2016. Middle and Upper Carboniferous (Pennsylvanian) macrofloral zones of the Donets Basin. *Geologičnij žurnal*, 1 (354), 21–35 (in Russian).
- Boyarina N.I. 2022a. Late Pennsylvanian vegetation cover changes in the Donets Basin: syndynamic aspect. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 56, 8–23. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-01>
- Boyarina N.I. 2022b. Morphological analysis and palaeoecology of seed ferns of the genus *Odontopteris* (Brongniart) Sternberg from the Late Pennsylvanian of the Donets Basin. *Collection of scientific works of IGS of the NAS of Ukraine*, 15 (1), 65–77. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2022.267431> (in Ukrainian).
- Boyarina N. 2023. The Late Pennsylvanian vegetation of the Donets Basin, Ukraine: Syntaxonomy of plant communities. *GEO&BIO*, 24, 64–98. <https://doi.org/10.15407/gb2406>
- Boyarina N. 2024. Late Pennsylvanian vegetation dynamics of the Donets Basin, Ukraine. *GEO&BIO*, 26, 45–78. <https://doi.org/10.53452/gb2605>
- Boyarina N.I., Kovalenko G.G. 2023. Palaeogeobotanical analysis of plant fossil assemblages from the Upper Pennsylvanian deposits of the Northern Caucasus. *Collection of scientific works of IGS of the NAS of Ukraine*, 16 (1), 81–97. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.296583> (in Ukrainian).
- Brenner R.L., McHargue T.R. 1988. Integrative stratigraphy, concepts and applications. Englewood Cliffs, New Jersey Prentice-Hall.
- Bushnell T.M. 1942. Some aspects of the soil catena concept. *Soil Science Society of America Proceedings*, 7, 466–476.
- Chekunov A.V. 1994. The geodynamics of the Dnieper-Donets rift syncline. *Geophysical Journal*, 16 (3), 3–13 (in Russian).
- Cleal C.J. 1991. Carboniferous and Permian biostratigraphy. In: Cleal C.J. (Ed.), *Plant fossils in geological investigation: The Palaeozoic*. Ellis Horwood, Series in Applied Geology. Chichester, pp. 182–215.
- Davydov V.I., Crowley J.L., Schmitz M.D., Poletaev V.I. 2010. High-precision U–Pb zircon age calibration of the global Carboniferous time scale and Milankovitch band cyclicity in the Donets Basin, eastern Ukraine. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11, 1–22. <https://doi.org/10.1029/2009GC002736>
- DiMichele W.A. 2014. Wetland-dryland vegetational dynamics in the Pennsylvanian ice age tropics. *International Journal of Plant Sciences*, 175, 123–164. <https://doi.org/10.1086/675235>
- DiMichele W.A., Hook R.W. 1992. Paleozoic terrestrial ecosystems. In: Behrensmeyer A.K., Damuth J.D., DiMichele W.A., Potts R., Sues H.-D., Wing S.L. (Eds.), *Terrestrial Ecosystems through Time*. Chicago, University of Chicago Press, pp. 204–325.
- Eros J.M., Montañez I.P., Osleger D.A., Davydov V.I., Nemyrovskaya T.I., Poletaev V.I., Zhikalyak M.V. 2012. Sequence stratigraphy and onlap history of the Donets Basin, Ukraine: Insight into Carboniferous icehouse dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 313–314, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.08.019>
- Fielding C.R., Frank T.D., Isbell J.L. 2008. The late Paleozoic ice age – A review of current understanding and synthesis of global climate patterns. In: Fielding C.R., Frank T.D., Isbell J.L. (Eds.), *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space*. Geological Society of America Special Paper, 441, 343–354.
- Fissunen O.P. 1975. The Donets Basin as a floristic standard of the Carboniferous in the south of the European part of the USSR. In: Timofeev P.P. (Ch. ed.), *Stratigraphy of the Carboniferous and geology of coal-bearing formations of the USSR: Proceedings of the VII International Congress on Stratigraphy and Geological of the Carboniferous*. Moscow: Nedra, pp. 90–101 (in Russian).
- Fissunen O.P. 1991. Zonal phytostratigraphical scale of the Lower and Middle Carboniferous of the Donets Basin. *Geologičnij žurnal*, 3 (258), 55–64 (in Russian).
- Fissunen O.P. 2000. On the problem of the Moscovian Stage. Lygansk: Izdatelstvo LGPU (in Russian).
- Gladenkov Y.B. 1990. Ecostratigraphy and the Northern Pacific Neogen Holarctic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77, 195–197.
- Guidebook for the excursion in the Donets Basin. VIII International Geological Congress on Stratigraphy and Geology. 1975. Moscow: Nauka (in Russian).
- Holland M.M., Risser P.G., Naiman R.J. 1991. Ecotones: the role of landscape boundaries in the management and restoration of changing environments. New York, NY: Chapman and Hall.
- Khain V.E., Michaylov A.E. 1985. General geotectonics. Moscow: Nedra (in Russian).
- Knight J.A., Wagner R.H., 2014. Proposal for the recognition of a Siberian Substage in the mid-Stephanian (West European chronostratigraphic scheme). *Paleontologie, Stratigraphie, Fazies*, 22 (C 548), 179–195.
- Knight J.A., Cleal C.J., Álvarez-Vázquez C. 2023. The challenge of relating the Kasimovian to west European chronostratigraphy: a critical review of the Cantabrian and Barruelian substages of the Stephanian Stage. In: Lucas S.G., DiMichele W.A., Opluštil S., Wang X. (Eds.), *Ice Ages, Climate Dynamics and Biotic Events: The Late Pennsylvanian World*. Geological Society, London, Special Publications, 535, 31–71. <https://doi.org/10.1144/SP535-2022-189>
- Krassilov V.A. 1970. Paleoecosystems. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Series "Geology"*, 4, 114–150 (in Russian).
- Krassilov V.A. 1972. Palaeoecology of land plants (basic principles and methods). Vladivostok: Izdatelstvo BPI DVO RAN (in Russian).
- Krassilov V.A. 1977. Evolution and Biostratigraphy. Moscow: Nauka (in Russian).
- Krassilov V.A. 1978. Organic evolution and natural stratigraphical classification. *Lethaia*, 11, 93–104.
- Krassilov V.A., Zubakov V.A., Shuldiner V.I., Remizovsky V.I. 1985. Ecostratigraphy. Theory and methods. Vladivostok: DVNTs AN SSSR (in Russian).
- Lunev A.L., Reznikov A.P. 1968. Upper Series of the Carboniferous system. *Geology of the USSR*. 9. Northern Caucasus. Moscow: Nedra, pp. 128–130 (in Russian).
- Margalef R. 1986. Sucesión y evolución: su proyección biogeográfica. *Paleontología i Evolució*. 20, 7–26.

- Martinsson A. 1973. Editor's column: ecostratigraphy. *Lethaia*, 6, 441–443.
- Martinsson A. 1980. Ecostratigraphy: limits of applicability. *Lethaia*, 13 (4), 363.
- Merino-Tomé O., Gutiérrez-Alonso G., Villa E., Fernández-Suárez J., Llana J.M., Hofmann M. 2017. LA-ICP-MS U–Pb dating of Carboniferous ash layers in the Cantabrian Zone (N Spain): stratigraphic implications. *Journal of the Geological Society, London*, 174, 836–849. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-119>
- Meyen S.V. 1987. Fundamentals of Palaeobotany. Moscow: Nedra (in Russian).
- Meyen S.V. 1989. Introduction to the Theory of Stratigraphy. Moscow: Nauka (in Russian).
- Milne G. 1935. Some suggested units for classification and mapping, particularly for East African soils. *Soil Research*, 4, 183–198.
- Montañez I.P. 2022. Current synthesis of the penultimate icehouse and its imprint on the Upper Devonian through Permian stratigraphic record. In: Lucas S.G., Schneider J.W., Wang X., Nikolaeva S. (Eds.), *The Carboniferous Timescale*. Geological Society, London, Special Publications, 512, 213–245.
- Montañez I.P., Poulsen C.J. 2013. The late Paleozoic ice age: an evolving paradigm. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 629–656. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100118>
- Novik E.O. 1978. Flora and phytostратigraphy of the Upper Carboniferous of the Northern Caucasus. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Odum Y. 1975. Fundamentals of Ecology. Moscow: Mir (in Russian).
- Olóriz F., Caracuel J.E., Ruiz-Heras J.J., Rodríguez-Tovar F.J., Marques B. 1996. Ecostratigraphic approaches, sequence stratigraphy proposals and block tectonics: examples from epicontinental swell areas in south and east Iberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 121, 273–295.
- Olóriz F., Reolid M., Rodríguez-Tovar F.J. 2012. Palaeogeography and relative sea-level history forcing eco-sedimentary contexts in Late Jurassic epicontinental shelves (Prebetic Zone, Betic Cordillera): An ecostratigraphic approach. *Earth-Science Reviews*, 111, 154–178.
- Opluštil S., Schmitz M., Cleal C.J., Martinek K. 2016. A review of the Middle-Late Pennsylvanian west European regional substages and floral biozones, and their correlation to the Geological Time Scale based on new U–Pb ages. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154, 301–335. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2016.01.004>
- Opluštil S., Cleal C.J., Wang J., Wan M. 2021. Carboniferous macrofloral biostratigraphy: an overview. In: Lucas S.G., Schneider J.W., Wang X., Nikolaeva S. (Eds.), *The Carboniferous Timescale*. Geological Society, Special Publications, 512, 813–863. <https://doi.org/10.1144/SP512-2020-97>
- Poletaev V.I., Vdovenko M.V., Shchogolev O.K., Boyarina N.I., Makarov I.A. 2011. Stratotypes of the Carboniferous and Lower Permian regional stratigraphic subdivisions of the Don-Dnipro Depression. Kyiv: Lohos (in Ukrainian).
- Retallack G.J. 1978. Floral ecostratigraphy in practice. *Lethaia*, 11, 81–83.
- Stovba S., Stephenson R.A. 1999. The Donbas Foldbelt: its relationships with the uninverted Donets segment of the Dnieper–Donets Basin, Ukraine. *Tectonophysics*, 313, 59–83.
- Stovba S., Stephenson R.A., Kivshik M. 1996. Structural features and evolution of the Dniepr–Donets Basin, Ukraine, from regional seismic reflection profiles. *Tectonophysics*, 268, 127–147.
- Shchogolev O.K. 1960. On the question of the Carboniferous and Permian boundary in the Donets Basin. *Geologičnij žurnal*, 20, 1 (70), 47–57 (in Ukrainian).
- Shchegolev A.K. 1975. Evolution of the flora and vegetation of the territory of the south of the European part of the USSR from the end of the Middle Carboniferous to the beginning of the Permian. The volume and division of the upper, Stephanian, division of the Carboniferous system. In: Timofeev P.P. (Ch. ed.), *Stratigraphy of the Carboniferous and geology of coal-bearing formations of the USSR: Proceedings of the VII International Congress on Stratigraphy and Geological of the Carboniferous*. Moscow: Nedra, pp. 101–108 (in Russian).
- Shchegolev A.K. 1979. The Upper Carboniferous of the Northern Caucasus in the Zelenchuk-Teberda interfluvium (flora, vegetation, stratigraphy, paleogeography). Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Shchegolev A.K. 1985. Evolution of the Late Carboniferous vegetation cover of the Westphalian Province, its regularities and significance for stratigraphy: author's abstract. dis. ... doctor geol.-mineral. sciences: 04.00.09. Leningrad. 35 p. (in Russian).
- Shchegolev A.K. 1991. Lycopside and Sphenopsida of the late Carboniferous. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Shchegolev A.K., Kozitskaya R.I. 1975. To the question of biostratigraphic substantiation of the Upper and Middle Carboniferous boundary in the Donets Coal Basin. In: *Stratigraphy and biogeography of the seas and land of the Carboniferous period on the territory of the USSR*. Kyiv: Vishcha Shkola, pp. 62–68 (in Russian).
- Sukachev V.N. 1928. Plant communities (Introduction to phytosociology). Moscow; Leningrad: Kniga (in Russian).
- Sukachev V.N. 1942. On the principles of genetic classification in biocoenology. *Journal of General Biology*, 1–3, 5–17 (in Russian).
- Shennikov A.P. 1964. Introduction to Geobotany. Leningrad: Leningrad State University Press (in Russian).
- Wagner R.H. 1984. Megafloral Zones of the Carboniferous. In: Sutherland P.K., Manger W.L. (Eds.), *9e Congrès International de Stratigraphie et Géologie du Carbonifère*. Washington and Champaign-Urbana, 1979: *Compte Rendu*, 2. Biostratigraphy. Carbondale and Edwardsville: Southern Illinois University Press, pp. 109–134.
- Wagner R.H., Álvares-Vázquez C. 2010. The Carboniferous floras of the Iberian Peninsula: A synthesis with geological connotations. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 162 (3), 239–324.
- Yakushova A.F., Khain V.E., Slavin V.I. 1988. General Geology. Moscow: Moscow State University Press (in Russian).
- Yanev S., Adamia S. 2010. General correlation of the Late Palaeozoic sequences in the Balkans and the Caucasus. *Yerbilimleri*, 31 (1), 1–22.
- Young A. 1972. The soil catena: a systematic approach. *International Geography*, 22, 287–289.

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.350785>

UDC 551.763(477.7)

## Early Cretaceous (Albian) strata identified by palynology in the base of the Pradniprovsk-2 well, Black Sea shelf, Ukraine

**E-mail:** yakushin@ukr.net,  
<http://orcid.org/0000-0002-0963-2026>;  
hshevchuk@ukr.net,  
<https://orcid.org/0000-0001-7221-4540>;  
horishchenko@ugv.com.ua,  
<http://orcid.org/0009-0002-3174-7978>;  
vivi.vajda@nrm.se,  
<https://orcid.org/0000-0003-2987-5559>

**Received / Надійшла до редакції:**  
29.11.2025

**Received in revised form /  
Надійшла у ревізованій формі:**  
26.01.2026

**Accepted / Прийнята:**  
27.02.2026

**\*Corresponding author /  
Автор для кореспонденції:**  
L.M. Yakushyn, yakushin@ukr.net

**Keywords:** Albian, palynostratigraphy,  
Black Sea, drill core Pradniprovsk-2.  
**Ключові слова:** альб, паліно-  
стратиграфія, Чорне море,  
свердловина Прадніпровська-2.

L.M. Yakushyn<sup>1\*</sup>, O.A. Shevchuk<sup>1,3</sup>, I.I. Ishchenko<sup>2</sup>, V. Vajda<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; <sup>2</sup>Kyiv branch Ukrainian Research Institute of Natural Gases, Kyiv, Ukraine; <sup>3</sup>Swedish Museum of Natural History, Dept. of Palaeobiology, Stockholm, Sweden

**Ранньокрейдіві (альб) відклади, ідентифіковані за палінологією, у підшві свердловини Прадніпровська-2, шельф Чорного моря, Україна**

Л.М. Якушин<sup>1\*</sup>, О.А. Шевчук<sup>1,3</sup>, І.І. Іщенко<sup>2</sup>, В. Вайда<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут геологічних наук Нан України, Київ, Україна; <sup>2</sup>Київське відділення Українського науково-дослідного інституту природних газів, Київ, Україна; <sup>3</sup>Шведський музей історії природи, Стокгольм, Швеція

The borehole Pradniprovsk-2, located within the inner part of the Black Sea shelf, Ukraine, intersects a sedimentary succession of which the lowermost interval (2375–2370 m) is crucial yet controversial for regional Mesozoic stratigraphy. To refine its relative geological age, a detailed palynostratigraphical investigation of core samples was undertaken.

The palynological analysis revealed well-preserved and diverse assemblages characteristic for a near shore marine environment with pollen, spores and dinoflagellates present. The occurrence of age-diagnostic angiosperm pollen such as *Afropollis* together with abundant *Clavatipollenites* indicates an Aptian–Albian age, likewise *Asteropollis*, which first appear in the Barremian and reach a peak in the Albian, strongly indicates an Albian age for the studied deposits. The presence of early angiosperm taxa such as *Tricolpites maximus* and *Triorites* spp., widely recognized as markers for the early Albian, further supports this conclusion.

Gymnosperm pollen is present but subordinate, while fern spores and lycophytes constitute an additional minor component of the palynoflora. The taxonomic composition and proportional representation of the main pollen and spore groups show close similarity to Albian western European palynological assemblages.

The newly established Albian age for the lowermost interval of Pradniprovsk-2 well is further consistent with long-term stratigraphic interpretations of Mesozoic sequences on the northwestern Black Sea shelf, previously developed by teams of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine and SE “Naukanaftogaz”.

These findings refine the regional chronostratigraphic framework and contribute new evidence for understanding the geological evolution of this inner shelf zone during the Early Cretaceous.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2026. 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 National Academy of Sciences of Ukraine, 2026. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

**Citation:** Yakushyn L.M., Shevchuk O.A., Ishchenko I.I., Vajda V. 2026. Early Cretaceous (Albian) strata identified by palynology in the base of the Pradniprovsk-2 well, Black Sea shelf, Ukraine. *Geologičnij žurnal*, 1 (394), 21–30. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.350785>

**Цитування:** Якушин Л.М., Шевчук О.А., Іщенко І.І., Вайда В. Ранньокрейдіві (альб) відклади, ідентифіковані за палінологією, у підшві свердловини Прадніпровська-2, шельф Чорного моря, Україна. *Геологічний журнал*. 2026. № 1 (394). С. 21–30. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.350785>

## Introduction

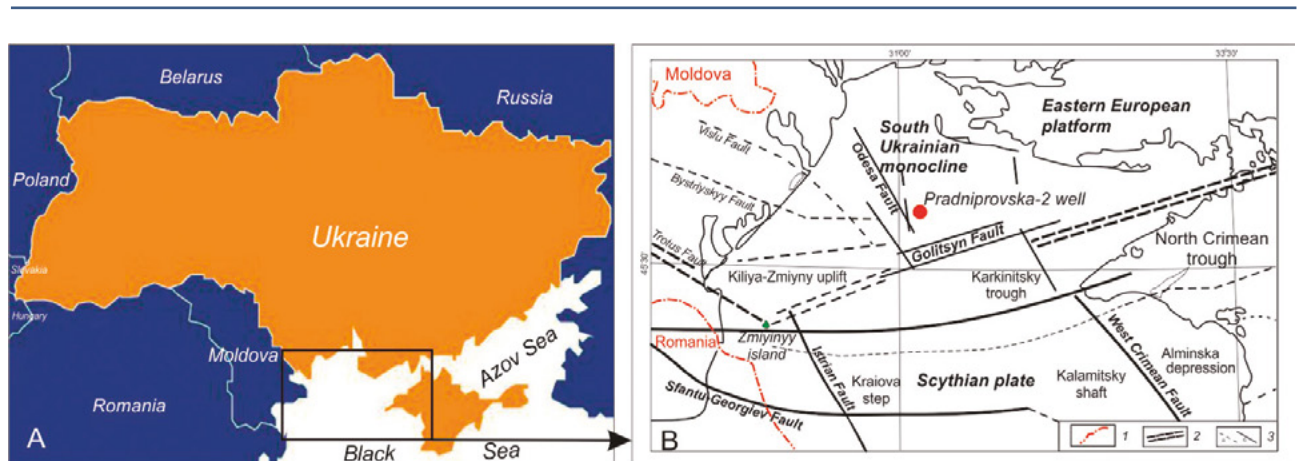
The Mesozoic sedimentary successions of Ukraine record the long-term geological evolution of the southern margin of the East European Platform and its transition into the peri-Tethyan realm. Following Late Paleozoic tectonic reorganization, large parts of the territory were occupied by shallow epicontinental seas and marginal-marine basins that accumulated predominantly Triassic – Cretaceous siliciclastic and carbonate deposits. These successions are best developed within the Dnipro-Donets Basin, the Donets Foldbelt, the Scythian Plate, and the northwestern shelf of the Black Sea, where they form a discontinuous but regionally extensive cover above the Paleozoic basement. The Triassic and Jurassic record is characterized by alternating continental, marginal-marine, and marine facies, reflecting repeated transgressive–regressive cycles, while the Cretaceous is dominated by widespread marine sedimentation associated with the expansion of epicontinental seas across southern Ukraine. Despite their stratigraphic importance, many Mesozoic successions – particularly in deep subsurface settings of the Black Sea shelf – remain poorly constrained in age due to limited macrofossil evidence and reliance on indirect lithological or geophysical correlations. Recent syntheses emphasize the critical role of palynology and integrated biostratigraphy for resolving these uncertainties and refining regional chronostratigraphic frameworks.

One of the controversial issues in the stratigraphy of Mesozoic sediments on the northwestern shelf of the Black Sea of Ukraine is the certainty regarding the presence of Jurassic deposits in deep wells (Khryashchenskaya et al., 2009). At present, the scientific literature presents differing viewpoints on the resolution

of this issue. A vivid example of such debate concerns the determination of the age of the successions at the base of the Pradniprovsk-2 well. While some researchers interpret these deposits as Late Jurassic in age (Dulub et al., 1999, 2001; Oil and Gas..., 2007; Stratigraphy..., 2013) or as Late Jurassic–Early Cretaceous (Zhabina et al., 2015), others assign them to the Early Cretaceous (Albian) (Gozhyk et al., 2006).

The Pradniprovsk-2 borehole was drilled in 1993, at the Pradniprovsk rise on the northwestern shelf of the Black Sea, Ukraine. We performed a palynological analysis of sediment samples from the base of the core with the aim to document and interpret the age of the successions and to make correlation with strata from North Crimea, Ukraine. We further aim to clarify the potential for oil and gas deposits (Fig. 1). The Pradniprovsk-2 borehole reaches a depth of 2375 m and based on the geological and geophysical characteristics of the strata within the interval 2210–2375 m, and by comparing with other well successions from the North Crimean trough, a decision was made to stop further drilling as the Paleozoic basement was thought to have been reached. However, paleontological studies of the sediments from the core have not confirmed a Paleozoic age.

The Pradniprovsk-2 well is a key succession in understanding the features of the geological structure of the inner (platform) zone of the northwestern shelf of the Black Sea. Although a stratigraphical framework exists, the age of the sediments in the lower part of the well are not known. To address this issue, we carried out palynological analyses of core samples from the base of the Pradniprovsk-2 well (interval 2375–2370 m). These studies included photo documentation, systematic identification, and stratigraphic interpretation based on the palynology.



**Fig. 1.** A – Locality map. B – Tectonic map of the western part of the Scythian plate (Starostenko et al., 2015) modified by Farfuliak, 2016 with red dot marking the Pradniprovsk-2 well. Fragment. Symbols: 1 – State border of Ukraine; 2 – southern border of the East European Platform; 3 – deep and regional faults (*a* – generally accepted, *b* – predicted)

## Geological setting

The Pradniprovsk-2 well is located within the inner, platform of the northwestern Black Sea shelf, a region geologically situated at the junction between the southern margin of the East European Platform and the northern sector of the Scythian plate (see Fig. 1). This area represents a structurally heterogeneous transition that experienced long-term subsidence throughout the Mesozoic, forming a system of depressions, uplifts, and monoclines that conditioned sediment accumulation (Geological..., 2006). The well is drilled on the crest of the Pradniprovsk uplift – one of a series of gently faulted structural highs that delineate the boundary between the Kiliya-Zmiinyi uplift to the west and the North Crimean trough to the southeast.

The succession in the region has been constrained by numerous geophysical investigations, including seismic profiles across the Scythian plate (Starostenko et al., 2015; Farfuliak, 2016), which reveal a relatively thin continental crust underlain by a mosaic of fault-bounded blocks. Within this framework, the northwestern shelf acted as a long-lived peri-Tethyan passive margin during the Mesozoic, receiving thick marine and marginal-marine sedimentary successions. The sedimentary cover of the platform sector is composed of an incomplete Jurassic–Cretaceous sequence unconformably overlying the Paleozoic basement.

The presence of Jurassic deposits in the deep subsurface has been a long-debated issue (Khryashchevskaya et al., 2009).

Previous stratigraphic models assigned the lowermost part of the Pradniprovsk-2 section (below ~2210 m) to the Upper Jurassic or Lower Cretaceous based on correlations with borehole successions from the North Crimean trough. These interpretations were based on fragmentary macrofossil identifications and geophysical correlations, but lacked palynological documentation. More recent regional studies – including integrated seismic, lithological, and biostratigraphic analyses (Geology..., 1984, 1985, 1987; Plotnikova et al., 2003; Gozhyk et al., 2006) – suggest that Cretaceous deposits are much more widespread in this part of the shelf than previously assumed, and that Jurassic sediments may not be penetrated at all by exploratory drilling in this structural zone.

The successions representing the basal part of the Pradniprovsk-2 well (2370–2375 m) comprises dark grey to black, dense siltstones and silty mudstones with localized quartzitic and carbonate

intercalations. The lithology indicates deposition in a low-energy, offshore to nearshore marine environment. These fine-grained siliciclastic units form part of a thicker Mesozoic succession that accumulated within a shallow, slowly subsiding shelf basin influenced by periodic freshwater inflow from the adjacent landmass. The presence of sparse, reworked Paleozoic palynomorphs within the interval is consistent with erosion of older terranes on the East European Platform and subsequent redeposition during the Mesozoic.

The Early Cretaceous geological evolution of the region was marked by continued subsidence and the establishment of a broad epicontinental sea. During the Albian, widespread marine transgressions occurred across the northwestern Black Sea shelf, accompanied by increased clastic input from the emergent platform. Comparable lithofacies and biostratigraphic patterns have been documented in neighboring areas, including the Odesa shelf and the Karkinitzky trough (Geological..., 2006). This regional context provides a coherent geological framework for the palynostratigraphical study of the Pradniprovsk-2 succession.

## Tectonic framework

The decisive role in the formation of the modern geostructural plan of the northwestern shelf of the Black Sea was played by the rift and post-rift stages of the development of the territory lasting 60 million years (Early Cretaceous–Paleogene). The rift stage (the stage of extension of the territory) lasted from the Aptian (?), Albian to the Santonian, and the post-rift stage (the stage of thermal submergence) – from the Campanian to the Eocene (Late Eocene ?) (Geological..., 2006; Farfuliak, 2016; Stovba et al., 2020, 2023).

The tectonic evolution of the northwestern shelf of the Black Sea, repeated transgressions and regressions of the sea basin during the Early Cretaceous – Paleogene influenced the completeness of the geological record of the studied region, the features of sedimentation, the lithological composition of rocks, the evolution of the organic world of the specified territory and determined the sequence of geological processes (events) that led to the formation of the main elements of the hydrocarbon system: oil and gas source strata, reservoir rocks, shielding rocks and hydrocarbon traps.

The Early Cretaceous tectonic evolution of this area was governed by passive-margin dynamics along the northern Tethys. Subsidence affected

most of the Scythian plate, forming a broad epicontinental shelf (Khryashchevskaya et al., 2009). This formed accumulation-space accommodating thick marine clastic successions. Continued extensional deformation and block faulting played a key role in the differentiation of structural highs (such as the Pradniprovska uplift) and depressions (such as the Karkinitzky and North Crimean depressions) (see Fig. 1).

The structural position of the Pradniprovska uplift has important stratigraphical implications. As a gentle, long-lived high separating adjacent depocenters, it was subject to reduced sedimentation and periods of non-deposition, which partly explains the incomplete stratigraphic record and the difficulty in resolving the age of the deeper intervals. Furthermore, regional fault systems bounding the uplift facilitated selective reworking of Paleozoic units, contributing to the presence of redeposited palynomorphs in Cretaceous sediments.

## Materials and Methods

### Materials

The study materials comprise core samples from the lower part of the Pradniprovska-2 well from the intervals: 1701–1697 m, 1717–1706 m, 2090–2093 m, and 2375–2370 m (base). The samples were collected in 2006 as part of a research project focusing on geological and geophysical exploration of oil and gas and the future potential for hydrocarbon exploration in the Ukrainian sector of the Black and Azov Seas. The samples are hosted at the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine by the Research Institute of Oil and Gas Industry of the National Joint-Stock Company “Naftogaz of Ukraine” (earlier – SE “Naukanaftogaz”).

### Palynology Methods

Palynological processing of core samples was carried out at Global Geolab Limited (Alberta, Canada) according to standard palynological procedures where 10 grams of sediment were treated with hydrochloric acid (HCl) and then with hydrofluoric acid (HF, 30%). The organic residue was sieved through a sieve with a 5- $\mu\text{m}$  mesh size (to prevent loss of small grains of angiosperms) and fixed in epoxy resin on two microscope slides. In addition, one slide with kerogen was prepared. Subsequently, palynomorphs from an entire slide were identified and the relative abundance (%) of

the different groups was calculated. For detailed processing information see Vajda & Kear (Vajda, Kear, 2024).

Although this study focuses on the palynostratigraphy of the basal, unknown 2375–2370 m of the succession, samples from the intervals 1706–1697 m and 1717–1706 m were also analysed using scanning electron microscopy (SEM FEI Quanta FEG 650, Swedish Museum of Natural History) to obtain high-resolution images of dinophyte cysts and angiosperm grains, as well as other pollen, spores, and other microfossils of interest.

Palynomorphs were studied in permanent slides using an Olympus BX51 biological modular light microscope. The illustrated palynomorphs were given specimen numbers used for palaeobiology collections at the Swedish Museum of Natural History (NRM), also England Finder coordinates have been provided. The slides and residues are stored in the collections at the Department of Palaeobiology at the Swedish Museum of Natural History, Stockholm, Sweden.

## Results and interpretation

The lithology of the studied interval of the Pradniprovska-2 well (2370–2375 m) is chiefly represented (according to the description of the core from the well file) by dark gray siltstones, sometimes almost black and gray, dense, strong, quartz, weakly micaceous, unevenly weakly calcareous, silty, with quartzite-like and calcitized areas with rare layers of dark gray and black, silty, weakly micaceous, dense, strong, silty argillites (Fig. 2).

### General composition of the palynological assemblages

A palynological association was identified in the studied samples, characteristic of marine environments with presence of dinoflagellate cysts in all samples. The organic content is high with a varied palynofacies. Microfossils comprises spores, both gymnosperms and angiosperm pollen, as well as dinoflagellates, green alga, wood remains and plant cuticles. Spores constitute 15% of the flora; gymnosperm pollen about 25% (mainly represented by bisaccate pollen grains with a smaller portion of monosulcate pollen). Angiosperm pollen comprises slightly less than 16% of the total relative abundance. Dinoflagellates constitute approximately 38% of the total number of palynomorphs (Fig. 3).

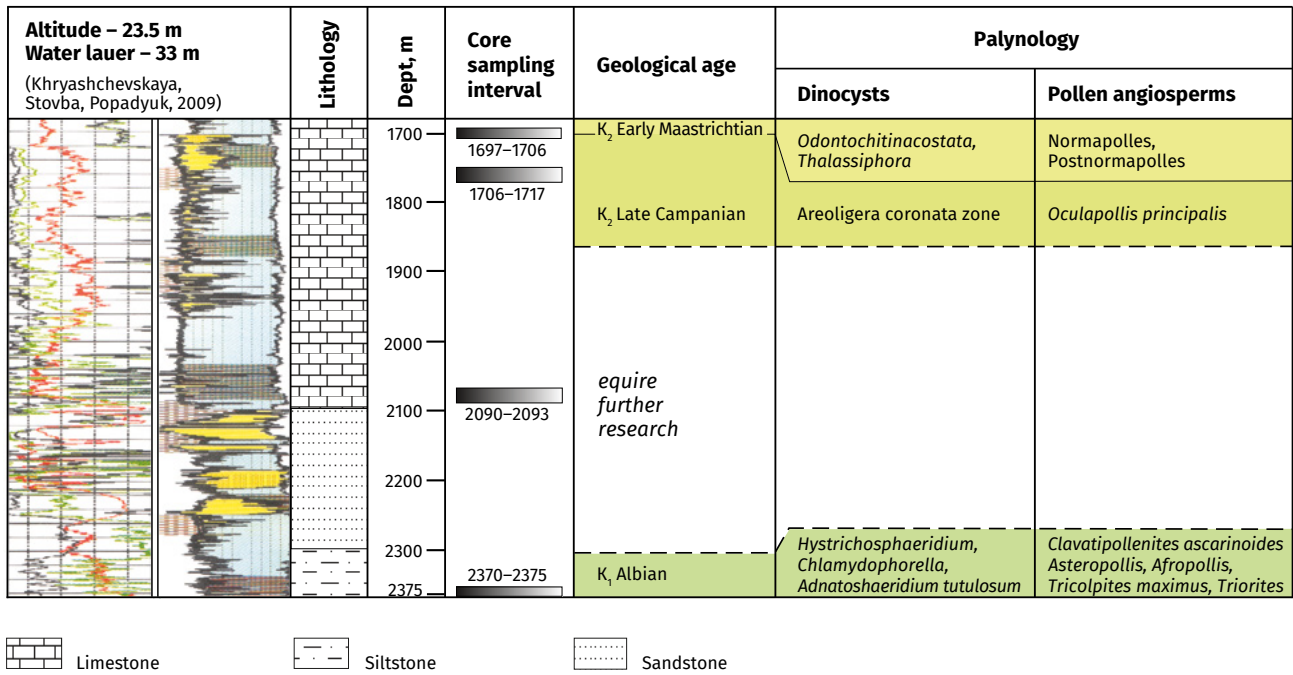


Fig. 2. Geological section of the Pradniprovska-2 well and palynological characteristics

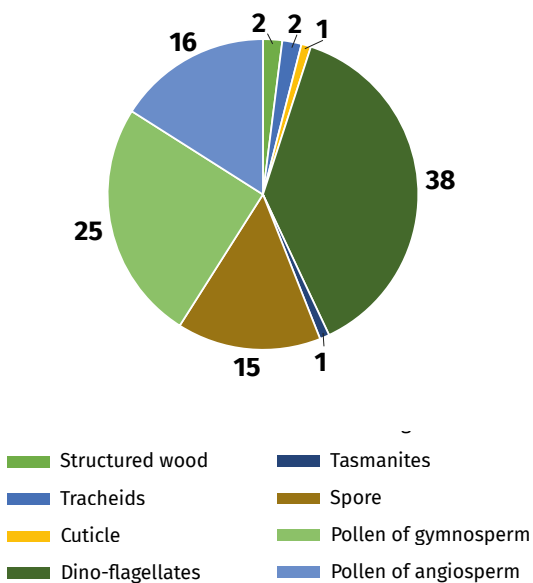


Fig. 3. Relative abundance (%) of major palynological groups in the studied samples

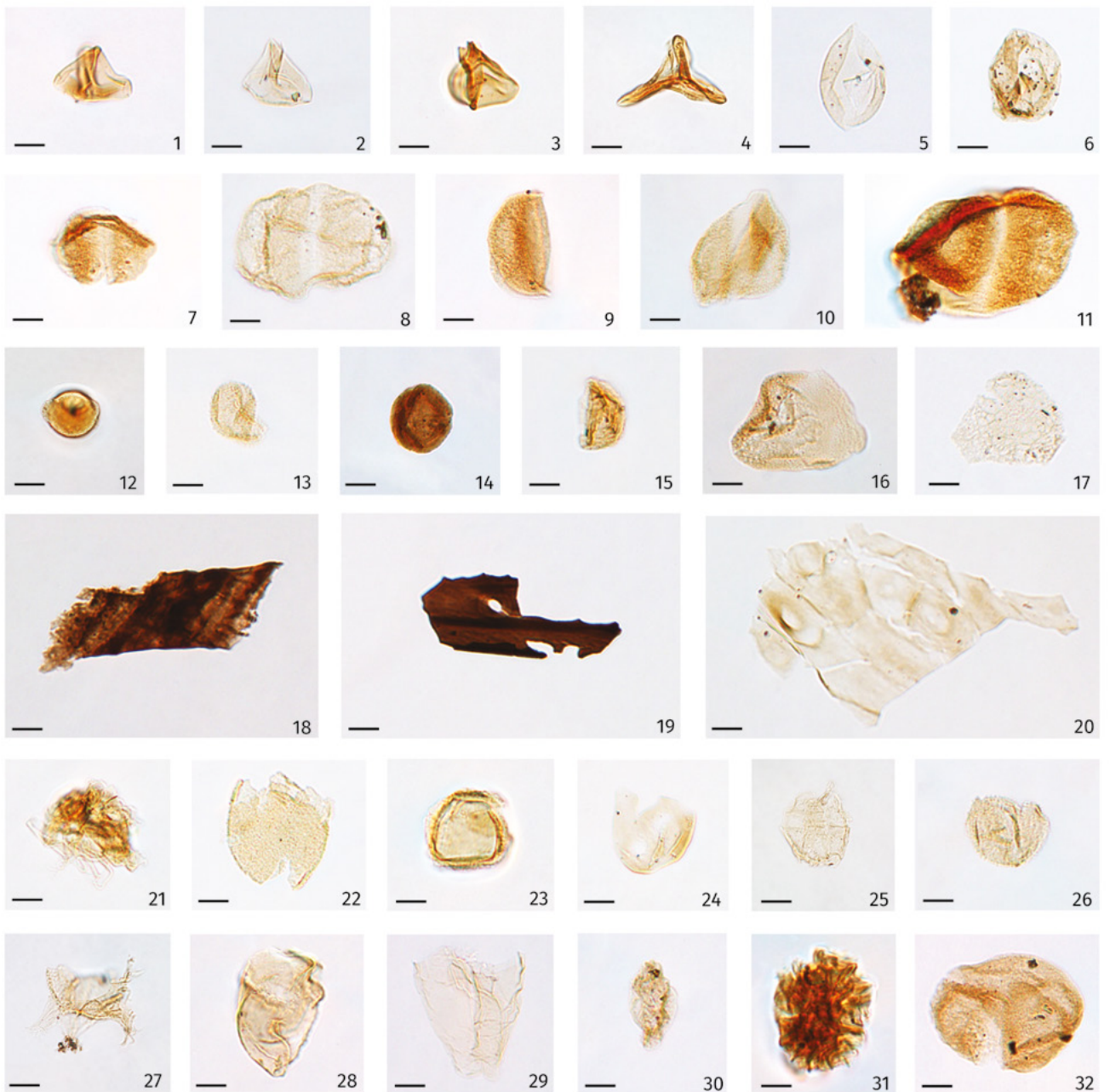
### Taxonomic composition of the palynological assemblage

A total of 126 pollen and spore taxa were identified, below we outline selected main groups. Spores are represented by 4 number of genera including the trilete spores *Gleichenioidites* spp., *Concavispores* sp., *Dictyophyllidites* sp., and *Leiotriletes* sp., gymnosperm pollen (5 number of genera) are mainly represented by *Araucariacites australis*

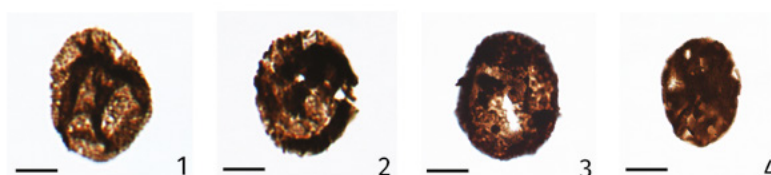
Cookson, *Cedripites* sp., *Pinuspollenites* sp., and the monosulcate *Cycadopites* sp. Angiosperm pollen (5 number of genera) are mainly represented by *Clavatipollenites* spp. *Asteropollis* spp., *Afropollis* sp., *Tricolpites maximus* (Couper) Kumar, and *Triorites* sp. Marine palynomorphs include the dinoflagellate cysts (8 number of genera) *Leptodinium* sp., *Sentusidinium* sp., *Kallosphaeridium* sp., *Batiacasphaera* sp., *Ascodinium* sp., and many broken cysts belonging to *Hystrichosphaeridium* spp. Sparse *Adnatosphaeridium* spp. and *Chlamydophorella* sp. were recovered. The green algae, *Botryococcus braunii* Kützing, was also identified (Fig. 4). Additionally, reworked Paleozoic spores were identified in sediments from the interval 2375–2370 m (Fig. 5).

### Age assessment

Based on key angiosperm pollen taxa, we interpret the studied interval as Early Cretaceous, Albian in age. In particular, the identification of *Afropollis*, characteristic of an Aptian to Albian age, and the significant occurrence of pollen belonging to the genera *Clavatipollenites* spp. and *Asteropollis* sp., (which both appear in the Barremian and reach their peak of distribution in the Albian, for example: *Clavatipollenites ascarinoides*) support this interpretation. Additionally, the occurrence of the pollen taxa *Tricolpites maximus* and *Triorites* sp., both belonging to ancient angiosperm lineages, point to an Albian age.



**Fig. 4. Selected palynomorphs from the interval 2370–2375 m.** Taxon, England Finder Reference. Scale bar = 10  $\mu$ m. **Fern spores** (1–4): 1 – *Concavisporites* sp., L30-4; 2 – *Gleicheniidites* sp., H31-3; 3 – *Dictyophylliidites* sp., S10-2; 4 – *Gleicheniidites toriconcavus*, S18; **Gymnosperm pollen** (5–11): 5 – *Cycadopites* sp., U27-4; 6 – *Araucariacites australis*, T29; 7 – *Cedripites* sp., L21-4; 8 – *Pinuspollenites* sp., J29-4; 9 – Pinaceae, L20; 10 – *Pinuspollenites* sp., Q29; 11 – *Cedripites* sp., S21-4; **Angiosperm pollen** (12–17): 12 – *Triorites* sp., H28-3; 13 – *Clavati-pollenites ascarinoides* McIntyre, O37; 14 – *Clavati-pollenites* sp., Q30; 15 – *Asteropollis* sp., Q41-2; 16 – *Tricolpites* cf. *maximus*, O44-4; 17 – *Afropollis* sp., T36-3; **Plant matter** (18–20): 18 – Wood fragment, D23; 19 – wood fragment F23-1; 20 – Cuticle with stomata, O42; **Dinocysts** (21–30): 21 – *Adnatosphaeridium* cf. *tutulosum* Cookson and Eisenack, F24-4; 22 – *Sentusidinium* sp., G42-1; 23 – *Chlamydo-phorella* sp., H25-3; 24 – *Kallosphaeridium* sp., H26-3; 25 – *Leptodinium* sp., K39-3; 26 – *Batiacasphaera* sp., N27; 27 – *Hystrichosphaeridium* sp., L21; 28 – *Batioladinium* sp.? L22-3; 29 – *Tubotuberella* sp., M33-2; 30 – *Ascodinium* sp., H29-3; **Green algae** (31–32): 31 – *Botryococcus braunii*, J29, 32 – Sp. indet. L30-3



**Fig. 5.** Example of reworked, Permian to Late Devonian spores, from the interval 2375–2370 m. Taxon, England Finder Reference, Scale bar = 10  $\mu$ m. 1 – *Spinosisporites* sp., N37-3; 2 – *Apiculatisporis* sp., B15, N17; 3 – *Tuberculispora* sp.; 4 – *Reticulatisporites* sp., F13-1

Although the oldest record of hysrichospherid-ian dinocysts is in the Late Jurassic (Oxfordian–Tithonian), the abundance and diversity of this group in the studied samples indicates a Cretaceous age. Particularly, the occurrence of *Adnatoshaeridium* cf. *tutulosum* Cookson and Eisenack indicate an age younger than Aptian (119.82–94.12 Ma (Ogg et al., 2008)).

## Discussion

### Dating and comparison with other areas

Our results from the Pradniprovska-2 well are consistent with results from previous studies of Albian sediments in Ukraine and adjacent regions (Voronova, 1972, 1975, 1983, 1984, 1994; Shevchuk et al., 2021; Shevchuk, Pustovoitova, 2021), corroborating our stratigraphical assessment of an Albian age. A similar ratio of spore-pollen assemblages, dominated by *Clavatipollenites* spp., *Asteropollis* spp., *Afropollis* sp., and the presence first appearance datum of *Tricolpites maximus* and *Triorites* sp., was noted in sediments of both the northern and southern regions of Ukraine, which indicates the regional stability of this pollen-complex within the Albian time interval (Voronova, 1994).

The obtained results are also in agreement with the latest European palynological data (Shevchuk, Vajda, 2024), where similar associations of angiosperm pollen and dinocysts are considered characteristic of the Albian age. The consistent recurrence of assemblages with a similar composition hosting the palynocomplex; *Clavatipollenites* + *Asteropollis* + *Afropollis* + associated forms, from sections of sedimentary basins of Europe, the Middle East, and North America (Tanrikulu, Cornet, 2014; Barrón et al., 2015; Schrank et al., 2017) indicates the reliability of these angiosperm forms as markers for determining Albian sediments. This provides the basis to consider this palynological assemblage established in the section of the Pradniprovska-2 well in the depth interval of 2370–2375 m as a reliable stratigraphic Albian age-indicator.

### Comparison with marine macro- and microfossil data

Macrofossil remains, including fragments and steinkerns of bivalves, *Pseudolimea alternicostata* (Buvign.), *Aulacomiaella problematica* (Furl.), *Radulopecten* (*Radulopecten*) *indequicostatus* (Phil.), and *Plagiostoma* (*Aequipecten*) *laurae* (Etall.) has been reported from the depth interval 2242–2233 m (Dulub et al., 1999).

From the depth interval 2265–2272 m, V.G. Dulub identified foraminiferal remains including *Epi-stomina* cf. *stellicostata* Biel. et Paz., *Belorussiella volinianensis* Biel., *Verneulina* sp., and *Dentalina* sp. Additional foraminiferal assemblages were reported from the interval 2375–2370 m, comprising *Anchispirocyclus* cf. *lusitanica* (Egger), *Anchispirocyclus* (?) sp., *Rectocyclus* *chouberti* Hoff., *Placopsilina* sp., *Pseudospirocyclus* sp., *Pseudospirocyclus* (?) sp. indet., *Haplophragmium* sp., and *Bramkampella* sp. indet. On the basis of the occurrence of representatives of the genus *Anchispirocyclus*, which are known from coeval deposits of southeastern Crimea, these sediments were interpreted as Tithonian in age (Dulub et al., 1999). At the same time, the authors noted that the preservation of the identified forms was significantly poorer than that of comparable taxa described by G.M. Voloshyna from well sections in the Tambov area (Voloshyna, 1977).

The same bivalve and foraminiferal taxa were subsequently cited in the characterization of Upper Jurassic deposits of the Black Sea region in Volume 1 of the monograph *Stratigraphy of the Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine*, where they were assigned a Kimmeridgian–Tithonian age (Stratigraphy..., 2013).

Based on a retrospective analysis of the stratigraphic distribution of faunal remains identified by R.Y. Leshchuk and V.G. Dulub, as well as drilling materials from the Pradniprovska-2 well (Dulub et al., 1999, 2001; Leshchuk et al., 1999; Oil and Gas..., 2007), Zhabina et al. (2015) concluded that the succession in the base of the well are of Tithonian–Berriasian age.

It should be emphasized, however, that the above-mentioned publications do not provide photographic documentation of the fossil material, which is an essential component of substantiated paleontological and biostratigraphic interpretation. The absence of such visual evidence limits the possibility of independent taxonomic verification and complicates stratigraphic correlation.

In contrast, during the geological and geophysical assessment of hydrocarbon potential in the Ukrainian sector of the Black and Azov Seas (2004–2006), conducted by the State Enterprise “Naukanaftogas”, L.F. Plotnikova, analyzing the foraminiferal assemblage identified by N.A. Trofymovych from the depth interval 2129–2375 m, noted a strong similarity to assemblages from the Odeska-2 and Bezimenna-2 wells. On this basis, it was suggest-

ed that sediments of both Albian and Cenomanian age may be present within this interval, with the Albian–Cenomanian boundary tentatively placed at approximately 2210 m according to geophysical data (Gozyk et al., 2006).

### Paleoenvironmental interpretation

The palynological assemblage recovered from the 2370–2375 m interval of the Pradniprovska-2 well provides important insights into the vegetation and depositional environment of the region during the Albian. The dominance of gymnosperms and ferns, together with a diverse dinoflagellate component, suggests that sedimentation occurred in a coastal or near-shore marine setting receiving continuous influx of terrestrial material from a well-vegetated hinterland.

The terrestrial vegetation was markedly diverse and stable, consisting mainly of conifers represented by Araucariaceae (pollen genus *Araucariacites*), Pinaceae (*Pinuspollenites*, *Cedripites*), and members of Cycadales (*Cycadopites*). Ferns were also prominent, indicated by the presence of *Concavisporites*, *Gleicheniidites*, and *Dictyophyllidites*, pointing to humid and warm conditions that favored dense understory fern communities. These data correspond to Albian floras reconstructed from macrofossil evidence in other regions, where conifer-dominated forest canopies coexisted with extensive fern-rich understories.

Angiosperm pollen grains are well represented and show moderate diversity, with key Albian taxa such as *Clavatipollenites*, *Asteropollis*, *Afropollis*, *Tricolpites maximus*, and *Triorites*. Their relative abundance ( $\approx 16\%$ ) is consistent with a phase of early angiosperm expansion characteristic of the Albian, when flowering plants began to diversify and spread into coastal and fluvial environments. These early angiosperms likely occupied a range of ecological niches, including shrub-level vegetation on floodplains and possibly aquatic or semi-aquatic habitats.

The presence of abundant marine dinocysts ( $\approx 38\%$ ), including *Hystrichosphaeridium*, *Kallosphaeridium*, *Batiacasphaera*, *Leptodinium*, and *Sentusidinium*, indicates deposition in a marine setting with normal salinity. The high diversity and excellent preservation of hystrichosphaerid forms are consistent with fully marine conditions typical of the Cretaceous. At the same time, the occurrence of freshwater–brackish green algae such as *Botryococcus braunii* suggests periodic freshwater influx

into the basin. This combination infers a coastal shelf or lagoonal environment influenced by river discharge, where terrestrial plant material was efficiently transported into the marine system.

Vegetation signals show no sharp changes throughout the studied interval, suggesting stable ecological conditions during the deposition of these sediments. The balance between terrestrial and marine palynomorphs implies a long-lived, stable interaction between land and sea, perhaps reflecting a broad coastal plain with adjacent shallow marine embayments.

Comparable Albian palynofloras from other regions, such as the northern Black Sea shelf, the Middle East, and western Europe, show a similar dominance of conifers and ferns, accompanied by the characteristic *Clavatipollenites*–*Asteropollis*–*Afropollis* angiosperm complex. Such similarities underscore the regional climatic stability and widespread distribution of these plant communities across the northern margin of the Tethys Ocean during the Albian.

The preservation of organic material, including delicate cuticles and plant tracheids, suggests low levels of oxidation on the seafloor, consistent with dysoxic bottom waters. The dark, dense siltstones and mudstones support this interpretation, indicating sedimentation in a low-energy environment with periodically restricted circulation. However, the presence of diverse and abundant dinocysts implies that surface waters remained oxygenated and biologically productive.

### Conclusions

When integrating and comparing our results from the detailed palynological analyses of both marine and continental palynomorphs with previous results from local and regional studies we conclude that the base of the Pradniprovska-2 well is Early Cretaceous in age, indicating that the core only reached Albian sediments. Our study further shows that the succession in the base of the Pradniprovska-2 well reflects sedimentation in a shallow-marine, nearshore environment influenced by influx of freshwater. This sea was bordered by conifer-dominated forests with expanding angiosperm communities growing in a relatively humid environment. The palynological signatures confirm a stable, warm-temperate to subtropical climate and provide a coherent picture of Albian paleoenvironmental conditions that agrees with regional and intercontinental data.

The validity of our new conclusions about the geological age of the studied section of the Pradniprovsk-2 well is first confirmed by photo documentation of the studied microfossils in accordance with accepted international standards. The correlation of the composition of the identified palynological assemblage with assemblages from other intervals of the lower part of the Cretaceous system of the territory of Ukraine and adjacent regions indicates its regional stability within the Albian time interval.

This new information revealing an Albian age of these deposits is the result of many years of comprehensive stratigraphic studies of the sedimentary succession of the northwestern shelf of the Black Sea, obtained by specialists of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine and the Research Institute of Oil and Gas Industry of the National Joint-Stock Company "Naftogaz of Ukraine".

In addition to their stratigraphic significance, the Mesozoic successions of southern Ukraine and the northwestern Black Sea shelf are of considerable interest for hydrocarbon exploration. Numerous Triassic – Cretaceous intervals contain elevated amounts

of dispersed organic matter deposited under low-energy marine to marginal-marine conditions, providing favourable prerequisites for hydrocarbon source rock development.

The results obtained are an important step towards a better understanding of the geological structure of the northwestern shelf of the Black Sea and further qualitative interpretation of seismic survey materials.

**Acknowledgements.** *The work was carried out within the framework of fundamental research of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine within the state funded program "Biota of Triassic–Lower Paleogene sediments of Ukraine: taxonomic, stratigraphic and paleogeographic aspects". We also thank the associate professor of the Department of General and Historical Geology and Paleontology of the Faculty of Geology of the Ivan Franko Lviv National University A.V. Ivanina for the identification of Paleozoic age spores. Funding is acknowledged from the Knut & Alice Wallenbergs stiftelse KAW 2020.0145 (to VV) and Swedish Foundation for Strategic research – grant UKR22-0020 and UKR24-0019 (O.A. Shevchuk).*

Свердловина Прадніпровська-2 розташована в межах українського сектору північно-західного шельфу Чорного моря. З метою встановлення відносного геологічного віку вибіркової частини розрізу (інтервал глибин 2370–2375 м), що має ключове значення для регіональної стратиграфії мезозою цього регіону, виконано палінологічні дослідження керованого матеріалу, які включали фотофіксацію, таксономічну ідентифікацію та стратиграфічну інтерпретацію всіх груп мікрофітофосилій. За допомогою палінологічного аналізу встановлено наявність добре збережених і таксономічно різноманітних комплексів, характерних для прибережно-морських умов осадо накопичення, за участю пилку, спор і диноцист. Виявлення віково-діагностичних таксонів покритонасінних, зокрема *Afropollis* у поєднанні з численними *Clavatipollenites*, свідчить про апт-альбський вік. Присутність *Asteropollis*, перша поява яких приурочена до барему, а максимум поширення – до альбу, обмежує вік відкладів альбом. Наявність *Tricolpites maximus* і *Triorites* spp., які розглядаються як маркери раннього альбу, додатково підтверджує таку інтерпретацію. Пилок голонасінних має підпорядковане значення, тоді як спори папоротей і лікофітів формують незначний компонент паліноспектра. Таксономічна структура і співвідношення основних груп пилку та спор демонструють високу подібність до альбських палінологічних комплексів Західної Європи. Отримані палінологічні дані дозволяють датувати вибірку частини свердловини Прадніпровська-2 альбом. Встановлений вік узгоджується з результатами попередніх стратиграфічних досліджень мезозойських відкладів північно-західного шельфу Чорного моря, що були отримані співробітниками Інституту геологічних наук НАН України та ДП «Наука Нафтогаз» протягом багаторічних комплексних досліджень осадового чохла цього регіону. Отримані результати уточнюють регіональну хроностратиграфічну модель осадового чохла та надають нові дані для розуміння геологічної еволюції цієї внутрішньої зони шельфу впродовж крейдового періоду.

## References

- Barrón E., Comas-Rengifo M.J., Rodríguez-Lázaro J., Najarro M. 2015. Palynology of Aptian and upper Albian (Lower Cretaceous) amber-bearing outcrops of the southern margin of the Basque–Cantabrian Basin (northern Spain). *Cretaceous Research*, 52, 292–312. <http://doi.org/10.1016/j.cretres.2014.09.003>
- Dulub V.G., Leshchukh R.Y., Melnychuk P.M., Polukhtovych B.M., Turkevych Ye.V. 2001. New materials on Jurassic formations in the Black Sea area. *Tectonics and oil and gas potential of the Azov-Black Sea region in connection with the oil and gas potential of the passive margins of continents: Materials Conference*. Simferopol, pp. 41–46 (in Ukrainian).
- Dulub V.G., Leshchukh R.Y., Melnychuk P.M., Polukhtovych B.M., Turkevych Ye.V. 1999. Jurassic sediments of the northwestern shelf of the Black Sea. *Geology and geochemistry of fossil fuels*, 4, 101–110 (in Ukrainian).
- Farfuliak L.V. 2016. Deep structure of the western part of the Scythian microplate according to modern seismic data: Dissertation of Candidate of Geological Sciences. Kyiv. (in Ukrainian).
- Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. Stratigraphy. 1984. Kyiv: Naukova Dumka. (in Ukrainian).
- Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. Lithology. 1985. Kyiv: Naukova Dumka. (in Ukrainian).
- Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. Tectonics. 1987. Kyiv: Naukova Dumka. (in Ukrainian).
- Geological and geophysical assessment of oil and gas potential and allocation of priority hydrocarbon exploration sites for the Ukrainian sector of the Black and Azov Seas. Report. (Scientific Supervisor S.M. Stovba). 2006. Kyiv: State Enterprise "Nauknaftogas". (in Ukrainian).

- Gozhyk P.F., Maslun N.V., Ivanik M.M., Plotnikova L.F., Yakushyn L.M., Ishchenko I.I. 2006. Stratigraphy of Meso-Cenozoic sediments of the northwestern shelf of the Black Sea. Kyiv: Lohos. (in Ukrainian).
- Khryashchevskaya O.I., Stovba S.N., Popadyuk I.V. 2009. Stratigraphic basis of geological and geophysical studies of the Odessa shelf (northwestern part of the Black Sea): status, problems and solutions. *Geophysical Journal*, 31 (3), 17–31 (in Russian).
- Leshchukh R.Y., Permyakov V.V., Polukhtovych B.M. 1999. Jurassic deposits of southern Ukraine. Lviv: Eurosvit. (in Ukrainian).
- Oil and gas prospective objects of Ukraine. Scientific and practical foundations of the search for hydrocarbon deposits in the northwestern shelf of the Black Sea. (Ed. Gozhyk P.F.). 2007. Kyiv: EKMO. (in Ukrainian).
- Ogg J.G., Ogg G., & Gradstein F.M. 2008. The Concise Geologic Time Scale. 177. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Schrank E., Kuss J., Ouda K. 2017. Palynology and stratigraphy of the Albian–Cenomanian succession in Makhtesh Qatan, northern Negev, Israel. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 235, 73–95. <http://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2016.09.008>
- Plotnikova L.F., Maslun N.V., Ivanik M.M., Tsyhotska N.N., Shumnyk A.V. 2003. Stratigraphy of Cretaceous–Paleocene deposits and features of the geological development of the western part of the northwestern shelf of the Black Sea. *Geologičnij žurnal*, 2 (304), 27–38. (in Ukrainian).
- Schrank E., Kuss J., Ouda K. 2017. Palynology and stratigraphy of the Albian–Cenomanian succession in Makhtesh Qatan, northern Negev, Israel. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 235, 73–95. <http://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2016.09.008>
- Shevchuk O.A., Mcloughlin S., Vajda V. 2021. The first Cretaceous megaspores from Ukraine. *Cretaceous Research*, 118, 104649. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2020.104649>
- Shevchuk O., Pustovoitova D. 2021. Stratification of Cretaceous deposits of the section No. 29 – Zakhidnookyabrsk (Karkinitko-North Crimean trough) by palynological data. *Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (94), 27–36. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.03> (in Ukrainian).
- Shevchuk O., Vajda V. 2024. Cretaceous (Albian–Coniacian) dinoflagellate biostratigraphy of the Vomb Trough, southern Sweden. *GFF*, 145, 3–4, 165–176. <https://doi.org/10.1080/11035897.2024.2312575>
- Starostenko V.I., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Środa P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Yu., Kolomyiets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A. 2015. Seismic model of the crust and upper mantle in the 675 Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the 676 Crimean Peninsula. *Geophys. J. Int.*, 201, 406–428. <http://doi.org/10.1093/gji/ggv018>
- Stovba S.M., Popadyuk I.V., Fenota P.O., Khriachtchevskaia O.I. 2020. Geological structure and tectonic evolution of the Ukrainian sector of the Black Sea. *Geophysical Journal*, 42, 5, 53–106. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215072>
- Stovba S., Stephenson R., Tyshchenko A., Fenota P., Vengrovych D., Mazur S. 2023. History of the geological development of the Ukrainian sector of the Black Sea from the middle of the Early Cretaceous to the beginning of the Late Miocene. *Geophysical Journal*, 45, 3, 3–49. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i3.282411> (in Ukrainian).
- Stratigraphy of the Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine. 1: Stratigraphy of the Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine. (Cor. ed. Gozhyk P.F.). 2013. Kyiv: Lohos. (in Ukrainian).
- Tanrikulu O., Cornet B. 2014. Early Cretaceous (Albian) spores and pollen from the Glen Rose Formation, Texas, USA. Berkeley eScholarship Repository, University of California Publications in Geological Sciences. 146. P. 1–70. <https://escholarship.org/uc/item/7z38083b>
- Vajda V., Kear B.P. 2024. An earliest Triassic riparian ecosystem from the Bulgo Sandstone (Sydney Basin), Australia: palynofloral evidence of a high-latitude terrestrial vertebrate habitat after the end-Permian mass extinction. *Alcheringa*, 48, 483–494. <https://doi.org/10.1080/03115518.2024.2392489>
- Voloshyna G.M. 1977. Microfauna and stratigraphic division of Upper Jurassic and Lower Cretaceous sediments in two wells of Eastern Crimea. *Reports of the Academy of Sciences of Ukrainian SSR. Ser. B*, 3, 195–198 (in Ukrainian).
- Voronova M.A. 1972. On the stratigraphic significance of spores and pollen of the Lower Cretaceous sediments of the East European Platform and its margins. *Tectonics and stratigraphy*. 1, 60–69 (in Ukrainian).
- Voronova M.A. 1975. To the issue of the evolution of the vegetation cover of Ukraine in the Albian–Cenomanian time and the problem of the Lower and Upper Cretaceous boundary. *Fossil fauna and flora*, 3, 122–126 (in Ukrainian).
- Voronova M.A. 1983. Changes in the structure of ancient phytocenoses in connection with the Albian–Cenomanian transgression in the south of Ukraine. Paleontology and reconstruction of the geological history of paleobasins. *Theses of the XXIX session of the All-Union Paleontological Society*. Leningrad, pp. 12–13 (in Russian).
- Voronova M.A. 1984. Miospores of the Early Cretaceous of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian).
- Voronova M.A. 1994. Palynostratigraphy of the Lower Cretaceous and development of Early Cretaceous floras of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Zhabina N., Anikeeva O., Kolodiy I., Mintuzova L. 2015. New data on sediment stratigraphy and hydrogeochemical conditions of the Pradniprovska area (northwestern shelf of the Black Sea). *Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (70), 18–22. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.70.03> (in Ukrainian).

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.344760>

УДК. 550.93

## Уран-свинцевий вік за цирконом кристалічних порід Інгульського мегаблоку

Л.М. Степанюк<sup>1\*</sup>, Л.В. Шумлянський<sup>1,2,3</sup>, О.Б. Висоцький<sup>1</sup>, А.М. Баран<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна; <sup>2</sup>Інститут геологічних наук Польської академії наук, Краков, Польща; <sup>3</sup>Університет Кьортіна, Перт, Австралія

### Uranium-lead zircon age of crystalline rocks of the Inhul domain

L.M. Stepanyuk<sup>1\*</sup>, L.V. Shumlyansky<sup>1,2,3</sup>, O.B. Vysotsky<sup>1</sup>, A.M. Baran<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; <sup>2</sup>Institute of Geological Sciences of the Polish Academy of Sciences, Krakow, Poland; <sup>3</sup>Curtin University, Perth, Australia

E-mail: stepaniuk@nas.gov.ua,  
<https://orcid.org/0000-0001-5591-5169>;  
lshumlyansky@yahoo.com,  
<http://orcid.org/0000-0002-6775-4419>;  
alek.vysotsky@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-3542-4685>;  
baranandrew9@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-5326-8014>

Received / Надійшла до редакції:  
27.11.2025

Received in revised form /  
Надійшла у ревізованій формі:  
02.02.2026

Accepted / Прийнята:  
27.02.2026

\*Corresponding author /  
Автор для кореспонденції:  
L.M. Stepanyuk, stepaniuk@nas.gov.ua

**Keywords:** granite, gneiss, zircon,  
uranium-lead isotope method, Inhul  
domain.

**Ключові слова:** граніт, гнейс, циркон,  
уран-свинцевий ізотопний метод,  
Інгульський мегаблок.

Supracrustal formations of the Inhul-Inhulets Group, which form the protolith for granitoids of the Kropyvnytsky (formerly Kirovohrad) and Novoukrainka complexes, are the most widespread in the geological structure of the Inhul Domain within the Ukrainian Shield. In the eastern part of the domain, Archean rocks of the Auly and Konka Groups occur, forming the protolith for plagiogranitoids of the Mesoarchean Inhul Complex. The morphology of zircon crystals from plagiomigmatite of the Inhul complex, plagiogneiss of the Spasove Formation of the Inhul-Inhulets Group, and porphyry-like granites of the Kropyvnytsky complex was studied using optical microscopy; their age determination was performed employing U-Pb LA-ICP-MS and SIMS methods. The isotopic composition of Hf in zircon from both plagiomigmatite and porphyry-like granite was also analysed. Zircon crystals from plagiomigmatite, based on the 207Pb/206Pb ratio, have ages ranging from 3251 ± 16 Ma to 2564 ± 53 Ma. The plagiogneiss of the Spasove Formation predominantly contains zircon of Archean age, with 13 out of 15 analysed crystals being older than 2.5 Ga. Most crystals lie on a discordia that intersects the concordia at 2939 ± 90 Ma and 2103 ± 210 Ma. Porphyry-like granites formed during the Paleoproterozoic (2060–2040 Ma) through melting of ancient crust, as indicated by numerous inherited zircon cores and the Hf isotopic composition (εHf ranging from -5.7 to -10.9, with a model age of approximately 3000 Ma according to the felsic crust model).

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2026. 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 National Academy of Sciences of Ukraine, 2026. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Цитування: Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В., Висоцький О.Б., Баран А.М. Уран-свинцевий вік за цирконом кристалічних порід Інгульського мегаблоку. *Геологічний журнал*. 2026. № 1 (394). С. 31–47. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.344760>

Citation: Stepanyuk L.M., Shumlyansky L.V., Vysotsky O.B., Baran A.M. 2026. Uranium-Lead zircon age of crystalline rocks of the Inhul domain. *Geologičnij žurnal*, 1 (394), 31–47. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.344760>

## Вступ

На території Інгульського мегаблоку за площею розвитку суттєво переважають супракрустальні утворення, що відносять до інгуло-інгулецької серії. Разом з тим у його східній частині закартовано архейські породи аульської та конкської серій, а в південно-західній – дністровсько-бузької (Державна..., 2001, 2002, 2004). Перші представлені типовими для Середньопридніпровського району асоціаціями плагіогнейсів, амфіболітів і кристалічних сланців, по яких розвиваються плагіогранітоїди, виокремлені в цій частині Українського щита в інгулецький мезоархейський комплекс. До дністровсько-бузької серії, закартованої в південно-західній частині мегаблоку, віднесені піроксенові плагіогнейси та кристалічні скланці (Єсипчук та ін., 2004).

Суперкрустальні утворення інгуло-інгулецької серії представлені біотитовими, піроксен-гранат-біотитовими, амфібол-піроксен-біотитовими плагіогнейсами, амфіболітами та кристалічними сланцями з підпорядкованими прошарками гранат- і графіт-біотитових гнейсів (Стратиграфические..., 1985). Наразі серію поділяють на (знизу вгору): зеленоріченську, артемівську, родіонівську, кам'яно-костовацьку (віковий аналог спасівська) та роцахівську (віковий аналог чечеліївська) світи (Єсипчук та ін., 2004). По породах серії розвиваються гранітоїди, виокремлені в два комплекси – новоукраїнський та кропивницький (кіровоградський, за (Єсипчук та ін., 2004; Щербаков, 2005)).

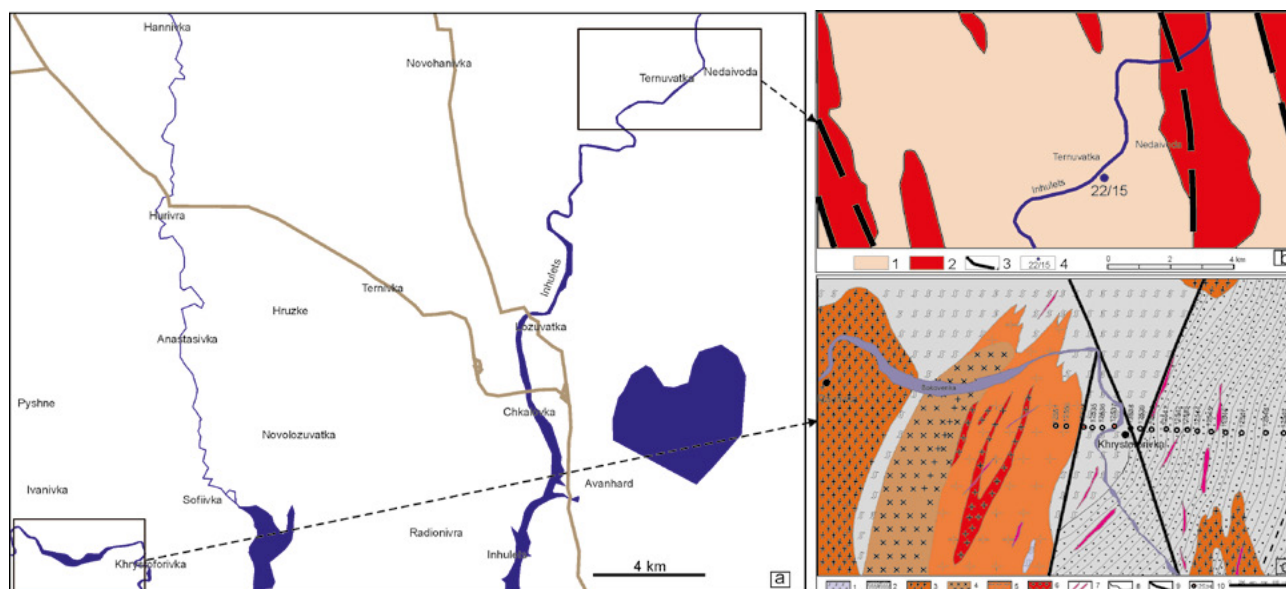
Інгуло-інгулецька серія корелюється з тетерівською, поширеною в Волинському районі, та криворізькою, розповсюдженою в межах Інгулецько-Криворізької шовної зони (Єсипчук та ін., 2004). Вік інгуло-інгулецької серії у Кореляційній хроностратиграфічній схемі раннього докембрію Українського щита визначено як пізньонеоархейський – палеопротерозойський. Однак наявні на теперішній час геохронологічні дані, отримані для циркону із порід інгуло-інгулецької серії (Щербак и др., 1995; Артеменко и др., 2019; Пономаренко та ін., 2021), вказують на переважно архейський їх вік. Крім того, мезоархейський вік новокриворізької світи (нижня світа криворізької серії) підтверджено наявністю в амфіболітах кристалів метаморфогенного циркону віком 2,97 млрд років (Степанюк та ін., 2011а). Архейському віку криворізької серії не суперечать

мезоархейські уран-свинцеві дати, отримані для кластогенного циркону із кварцитів латівського горизонту (Бобров та ін., 2011) і для кластогенних кристалів монациту та циркону із скелюватської та саксаганської світ Криворізької структури (Степанюк та ін., 2011б, 2020).

Зважаючи на деяку неузгодженість між наявними геохронологічними даними та положенням інгуло-інгулецької серії у чинній Кореляційній хроностратиграфічній схемі раннього докембрію Українського щита (Єсипчук та ін., 2004), нами виконано уран-свинцеве ізотопне датування кристалів циркону із гранітоїдів інгулецького комплексу, метаморфічних порід спасівської світи інгуло-інгулецької серії та гранітів, що по них розвиваються.

**Об'єкти дослідження.** Для уран-свинцевого ізотопного датування нами було відібрано ряд проб гранітоїдів: проба 22/15 – плагіомігатит (інгулецький комплекс), відслонений у лівому борту р.Інгулець, на південь від с. Тернуватка (рис. 1 б); проби 12534/4 і 12534/15 – граніти порфіроподібні (кропивницький комплекс), відібрані із керна св. 12534, гл. 50,8 та 119 м, відповідно (родіонівський профіль, залишки керна із свердловин, які зберігаються у керносковищі Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України). Суперкрустальні утворення репрезентує плагіогнейс (спасівська світа інгуло-інгулецької серії), проба 12537/2, відібраний із св. 12537, гл. 31,5 м, того ж родіонівського профілю (рис. 1 с).

**Методи дослідження.** Датування кристалів циркону U-Pb ізотопним методом було виконано за допомогою мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою з лазерною абляцією (LA-ICP-MS) у John de Laeter Centre, Curtin University, Australia. Абляцію циркону проведено за допомогою системи Resonetics RESolution M-50A-LR з використанням ексимерного УФ-лазера COMPEX 102–193 нм, підключеного до мас-спектрометра Agilent 8900 QQQ. Цирконієвий стандарт OG1 ( $3465 \pm 0,6$  млн років (Stern et al., 2009)); усі похибки наведено при  $2\sigma$  слугував основним еталонним матеріалом та аналізувався в блоках разом із вторинними стандартами GJ-1 ( $601,2 \pm 0,4$  млн років (Jackson et al., 2004)), Plešovice ( $337,13 \pm 0,37$  млн років (Sláma et al., 2008)) та Maniitsoq ( $3008,70 \pm 0,72$  млн років (Marsh et al., 2019)). Вторинні еталони дали середньозважені значення віку  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  та  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  у межах похибки рекомендованих значень.



**Рис. 1.** Географічне розташування ділянок геохронологічного опробування. **а** – супутникова карта. **б** – фрагмент геологічної карти (State..., 2002), Тернуватська ділянка, зі спрощеннями авторів, умовні позначення: 1 – плагіогнейси та плагіомігматити інгулецького комплексу, 2 – граніти кропивницького (кіровоградського) комплексу, 3 – розломи, 4 – місце відбору радіогеохронологічної проби плагіомігматиту, проба 22/15. **с** – фрагмент геологічної карти району родіонівського профілю (Решетняк і др., 1967\*), зі спрощеннями авторів, умовні позначення: 1 – гнейси біотитові, амфібол-біотитові спаської світи (State..., 2002; Yesypchuk et al., 2004); 2 – метапелітосквики польвошпат-біотит-кварцові, польвошпат-кварцові, сланці кварц-польвошпат-біотитові чечеліївської світи (State..., 2002; Yesypchuk et al., 2004); 3–7 – гранітоїди кропивницького (кіровоградського) комплексу: 3 – мігматити та граніти плагіоклазові, 4 – гранодіорити сірі та темно-сірі біотитові, 5 – граніти сірі, середньо-крупнозерністі, біотитові, порфіробластичні з ксенолітами біотитових гнейсів, 6 – граніти сірі середньо-дрібнозерністі, 7 – жили аплітів, пегматитів; 8 – контакти стратиграфічні; 9 – розломи; 10 – свердловини родіонівського профілю та їх номери

**Fig. 1.** Geographical location of geochronological sampling sites. **a** – satellite map. **b** – Fragment of the geological map (State..., 2002), Ternuvate site, simplified by the authors, Legend: 1 – plagiogneisses and plagiomigmatites of the Ingulets complex, 2 – granites of the Kropivnitsky (Kirovograd) complex, 3 – faults, 4 – location of the radio-geochronological sample of plagiomigmatite, sample 22/15. **c** – fragment of the geological map of the Rhodonian profile area according to (Reshetnyak et al., 1967\*) with simplifications by the authors. Legend: 1 – biotite gneisses, amphibole-biotite gneisses of the Spasivka suite according to (State..., 2002; Yesypchuk et al., 2004); 2 – feldspar-biotite-quartz, feldspar-quartz metapelite rocks, quartz-feldspar-biotite schists of the Chechelevska suite according to (State..., 2002; Yesypchuk et al., 2004); 3–7 – granitoids of the Kropivnitsky (Kirovograd) complex, 3 – migmatites and plagioclase granites, 4 – gray and dark gray biotite granodiorites, 5 – gray, medium-coarse-grained, biotite granites, porphyroblastic with xenoliths of biotite gneisses, 6 – gray medium-fine-grained granites, 7 – veins of aplites, pegmatites; 8 – stratigraphic contacts; 9 – faults; 10 – Rodionov profile wells and their numbers

Циркони з проби 22/15, з огляду на складний спектр отриманих віків, були повторно датовані в ізотопній лабораторії Триніті коледжу (Trinity College), Дублін, Ірландія. Для цього була використана лазерна абляційна система Photon Machines Analyte Excite 193 нм ArF, з'єднана з мас-спектрометром Agilent 7900. При визначенні ізотопного віку циркону розмір лазерного пучка становив 20 мкм. Обробка ізотопних даних U-Th-Pb здійснена за допомогою пакета IOLITE (Paton et al., 2011). Первинним еталонним матеріалом для калібрування був циркон 91500 ( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  вік становить  $1065,4 \pm 0,6$  млн років (Wiedenbeck et al., 1995)), а вторинними – циркон Plešovice, який під час нашої аналітичної сесії дав вік  $338,7 \pm 1,0$  млн років, і циркон WRS 1348 ( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  вік

сягає  $526,26 \pm 0,70$  (Pointon et al., 2012)), який дав вік  $526,6 \pm 2,0$  млн років.

В одній з проб (проба 12534/15) кристали циркону датували методом SIMS в Australian National University, м. Канберра, Австралія. Аналітична процедура та умови U-Pb аналізу були подібними до описаних у роботі (Williams, 1998). Інтенсивність первинного пучка іонів  $\text{O}^2$  становила 4–5 нА, а розмір аналітичної плями – приблизно 25 мкм.

Визначення ізотопного складу гафнію було проведено методом LA-MC-ICP-MS у лабораторії MILESTONE (RÉGEF ISOTOP-MTP, Geosciences Montpellier, Монпельє, Франція) з використанням мас-спектрометра Thermo Scientific Neptune XT у поєднанні з лазерною абляційною

\*Решетняк В.В., Рязузов Н.Т., Копыця М.П., Федюшин С.Е., Дмитриев Е.Н., Сергеев А.Д., Монаков Ф.К. Отчет по структурно-профильному бурению на Овнянском, Родионовском и Александровском участках за 1964–1966 гг. Кривой Рог, 1967. 219 с.

системою Teledyne Cetac Analyte Excite+. Деталі аналітичної процедури наведено в роботі (Artemenko et al., 2024). Розрахунок початкових значень  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  та  $\epsilon\text{Hf}$  для невідомих цирконів використовував прийнятий вік їх кристалізації, константу розпаду  $\lambda^{176}\text{Lu} = 1,867 \times 10^{-11}$  (Söderlund et al., 2004) і такі параметри для сучасного хондритового однорідного резервуара CHUR:  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0,282785$  та  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,0336$  (Bouvier et al., 2008).

Внутрішню будову кристалів циркону вивчали у штучних препаратах методом катодолюмінесценції та в прохідному світлі під бінокулярном і поляризаційним мікроскопом, а співвідношення з породотвірними мінералами – в прозорих шліфах під поляризаційним мікроскопом.

Кристали циркону вивчали та фотографували під оптичним мікроскопом Carl Zeiss Axio Imager 2 for materials та бінокулярним мікроскопом SZM-45T2.

## Результати та їхня інтерпретація

**Плагіомігматит** (бластокатаклизит по тоналіту) біотитовий, проба 22/15, відслонення у лівому борту р. Інгулець, на південь від с. Тернуватка. Порода світло-сіра, ділянками рожевувато-сіра дрібно-середньозерниста, слабо вивітрена, по тріщинах спостерігаються сірувато-бурі плями гідроокисів заліза. Рожевуватий відтінок породі надають гідроокиси заліза, які поширюються по зонках рекристалізації. Структура тектоногранокластова з елементами пойкилітової, рекристалізаційна. Основу породи складають кристалокласти плагіоклазу і гранобластові майже ізометричні скупчення кварцу, облямовані смугами з роздувами дрібно-тонкозернистого гранобластового матеріалу товщиною від 0,1 до 1,5 мм, або ж такі кристалокласти перетинаються

тонкими, прямолінійними тонкогранобластовими жилками (рис. 2). Об'єм тектономатриксу становить 25–35 %.

Мінеральний склад породи (об. %): плагіоклаз – 53–63, кварц – 32–39, біотит – 4–9, мусковіт – до 1. Акцесорні – титаніт, апатит, циркон.

*Плагіоклаз* утворює кристали білувато-сірого кольору розмірами 1–3 мм. Як правило, вони мають макро- та мікроскопічно видимі рекристалізаційні облямівки товщиною до 0,5–1 мм. За складом відповідає олігоклазу, часто має полісинтетичні двійники. В деяких кристалах добре помітні сліди пластичної деформації: деформаційні смуги, висячі двійники, викривлені полісинтетичні двійники. Досить часто плагіоклаз містить пойкилітові включення кварцу розміром до 0,1 мм. Мінерал слабо вивітрілий, через що в шліфах набуває нерівномірного сіро-коричневого забарвлення. Також він є складовою частиною тектономатриксу.

*Кварц* світло-сірий, утворює близькі до ізометричних скупчення розміром до 4 мм, сильно видовжені скупчення між кристалокластами плагіоклазу, а також присутній у тонкозернистому рекристалізованому матеріалі. Згасання мінералу зазвичай хвилясте.

Більшість лусок *біотиту* сконцентровані у більш-менш ізометричних скупченнях розміром 0,7–3,5 мм, які присутні в усіх частинах породи, але густина та розмір таких скупчень не завжди рівномірні. Як правило, вони розташовані на стику двох-трьох кристалокластів плагіоклазу та бластів кварцу. Істотно менша частка біотиту нерівномірно розміщується у решті тектономатриксу. Розмір лусок мінералу – десятки частки міліметра. Окремі луски біотиту плеохроюють від світлого зеленувато-коричневого до коричнево-зеленого кольору, а в скупченнях – від світло-коричневого до темно-брудно-коричневого.



**Рис. 2.** Плагіомігматит, проба 22/15, лівий борт долини р. Інгулець, на південь від с. Тернуватка

**Fig. 2.** Plagiomigmatite, sample 22/15, left bank of the Inhulets River south of the village of Ternuvatka

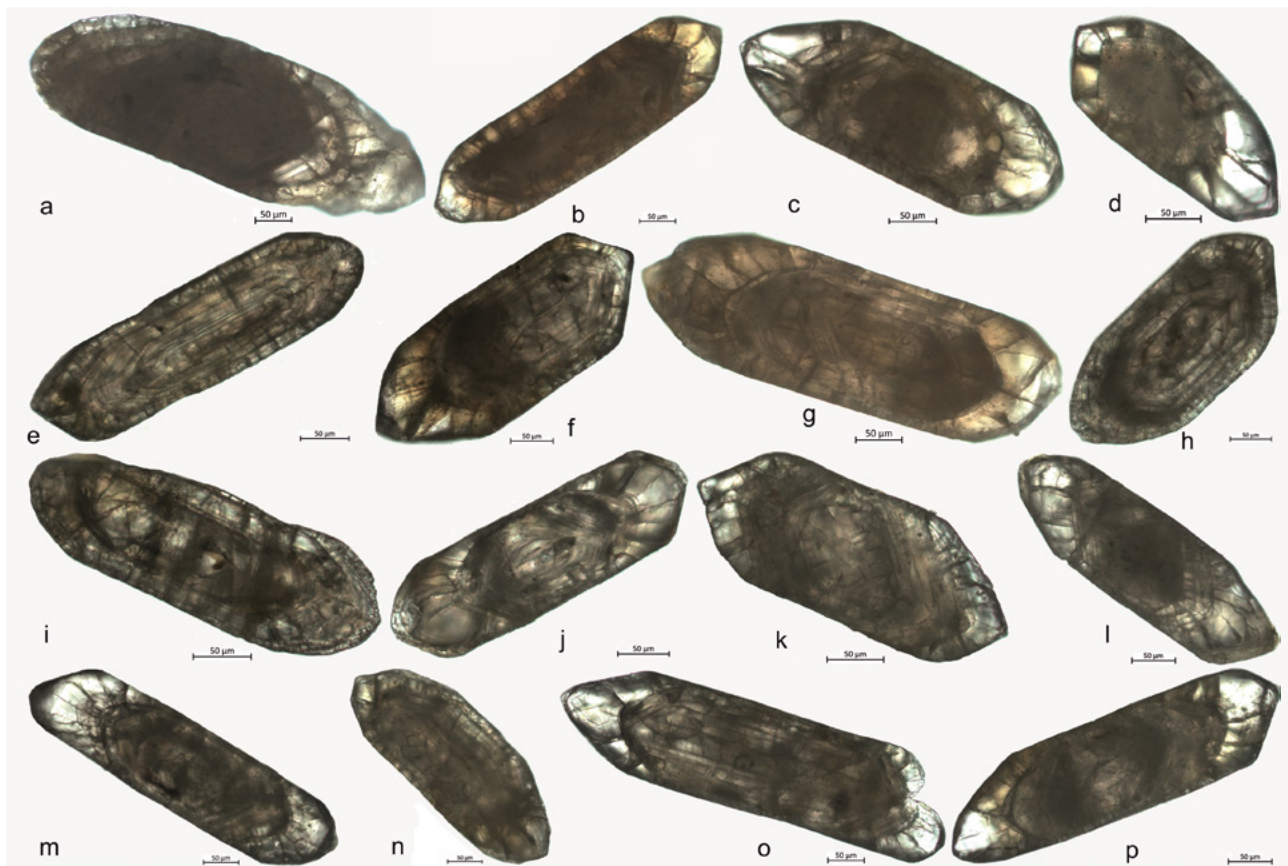
Найбільш густі скупчення біотиту сильно насичені тонкозернистим титанітом. Мінеральний склад одного з таких скупчень, розмір якого становить 1,5×1,5 мм, такий (%): біотит – 39–45, кварц – 30–34, титаніт – 24–28, мусковіт, поодинокі кристали циркону.

*Мусковіт* дуже нерівномірно розподілений у породі. Подекуди розвивається в окремих зернах плагіоклазу, переважно міститься у тектономатриці, лише в поодиноких випадках утворює ізометричні скупчення подібно до біотитових, але вони істотно меншого розміру – до 0,4 мм. Розмір лусок мінералу сягає від сотих часток міліметра до 0,5 мм, повністю безбарвний.

*Циркон* утворює доволі крупні (переважна більшість кристалів концентрується у фракції понад 0,1 мм) призматичні та видовжено-призматичні ( $K_{\text{вид}}$  – від 2,0–4,0 до 5) сильно тріщинуваті досконало огранені кристали. Їх огранення зумовлене комбінацією граней обох призм, що здебільшого мають приблизно однаковий розвиток, та обох граней тупих біпірамід і щонайменше із однієї з гострих граней. Колір кристалів сірувато-білий (близько 10 %), рудий,

сірувато-рудий (80–85 %) до сіро-бурого (майже 5 %) у сильно озалізненних кристалах.

У полірованих зрізах виявляється складна будова кристалів, обумовлена поєднанням трьох (у поодиноких кристалах) і двох (у більшості) генерацій циркону (рис. 3). Циркон першої генерації спостерігається у вигляді непрозорих і зрідка напівпрозорих ядер всередині кристалів, має темно-коричневе забарвлення. Друга генерація утворює оболонки навколо циркону першої генерації, зазвичай має світле рожеве забарвлення. Третя генерація утворює малопотужні наростання переважно на голівках кристалів на цирконі другої генерації (рис. 3 *i, j, l, n, o*). Серед кристалів циркону першої генерації (ядер) можна виділити два типи. Для першого характерними є правильні кристалографічні контури та тонка «магматична» зональність (рис. 3 *e-h, m, o*). Присутні складні ядра, всередині яких спостерігаються незональні ділянки (рис. 3 *k-p*). Ядра другого типу також мають правильні кристалографічні контури, але незональні (рис. 3 *a-d*). Трапляються поодинокі незональні ядра із заокругленими контурами (рис. 3 *i*).



**Рис. 3.** Мікрофотографії полірованих зрізів кристалів циркону із плагіомігматиту, проба 22/15, просвічуючий поляризаційний мікроскоп, за одного ніколя

**Fig. 3.** Microphotographs of polished sections of zircon crystals from plagiomigmatite, sample 22/15, transmission polarising microscope, at one analyser

**Таблиця 1.** Результати U-Pb ізотопного датування (LA-ICP-MS, Curtun University) циркону із кристалічних порід Інгульського району  
**Table 1.** Results of U-Pb isotope dating (LA-ICP-MS, Curtun University) of zircon from crystalline rocks of the Inhul region

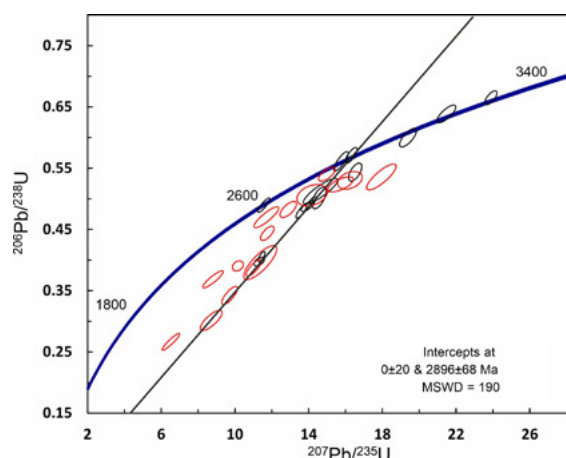
Spot #	Pb conc. ppm	Isotope ratio measured								ρ	Isotope age, Ma				D, %
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	2SE	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$	2SE	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2SE	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2SE		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	2SE	
<b>Sample 22/15, plagiomigmatite</b>															
1	166	0.2189	0.0057	1.9180	0.0363	15.739	0.569	0.5237	0.0101	0.66	2712	2850	2968	±39	8.6
2	99	0.2095	0.0068	3.4300	0.1754	8.7108	0.487	0.3015	0.0135	0.78	1692	2281	2900	±53	41.7
3	173	0.2028	0.0037	1.8579	0.0327	14.993	0.373	0.5401	0.0094	0.68	2782	2810	2842	±30	2.1
4	80	0.1939	0.0037	2.2686	0.0471	11.757	0.303	0.4436	0.0096	0.68	2364	2580	2768	±31	14.6
5	96	0.2112	0.0077	2.6555	0.1802	11.374	0.732	0.3958	0.0227	0.80	2133	2516	2900	±60	26.4
6	58	0.2057	0.0094	2.0031	0.0550	14.192	0.678	0.5058	0.0143	0.33	2633	2760	2862	±76	8.0
7	123	0.2088	0.0044	2.6373	0.1083	11.030	0.344	0.3872	0.0113	0.81	2106	2517	2887	±36	27.1
8	265	0.2439	0.0046	1.9022	0.0608	17.949	0.653	0.5355	0.0174	0.83	2757	2976	3139	±30	12.2
9	95	0.2085	0.0047	2.9507	0.1018	9.7126	0.349	0.3420	0.0121	0.78	1891	2397	2884	±37	34.4
10	263	0.1773	0.0047	3.8704	0.1552	6.5262	0.386	0.2664	0.0112	0.93	1518	2025	2614	±45	41.9
11	61	0.1945	0.0038	2.0890	0.0459	12.895	0.364	0.4826	0.0107	0.67	2535	2665	2773	±32	8.6
12	327	0.1725	0.0052	2.7282	0.0847	8.8096	0.451	0.3685	0.0113	0.89	2018	2303	2564	±53	21.3
13	243	0.1810	0.0050	2.1632	0.0654	11.705	0.551	0.4696	0.0140	0.87	2476	2563	2648	±45	6.5
14	310	0.1907	0.0045	2.5735	0.0450	10.161	0.239	0.3903	0.0068	0.28	2123	2445	2737	±39	22.4
15	157	0.2249	0.0076	1.9014	0.0416	16.244	0.544	0.5301	0.0118	0.34	2738	2881	2995	±55	8.6
<b>Sample 12534/4, porphyry granite</b>															
1	2619	0.1294	0.0024	2.5517	0.0396	7.0071	0.1760	0.3932	0.0063	0.75	2137	2108	2082	±32	-2.6
2	1458	0.1299	0.0032	2.4960	0.0364	7.1445	0.1838	0.4016	0.0056	0.46	2175	2129	2083	±43	-4.4
3	2305	0.1326	0.0028	2.7612	0.0324	6.6696	0.1556	0.3624	0.0042	0.38	1993	2065	2131	±39	6.5
4	1773	0.1258	0.0027	2.5200	0.0309	6.8541	0.1478	0.3965	0.0051	0.33	2152	2089	2030	±38	-6.0
5	3236	0.1249	0.0025	2.6813	0.0372	6.4200	0.1473	0.3727	0.0056	0.54	2041	2031	2019	±35	-1.1
6	2727	0.1250	0.0020	2.6794	0.0601	6.4666	0.1697	0.3756	0.0083	0.76	2054	2036	2023	±29	-1.5
7	3856	0.1256	0.0023	2.6352	0.0442	6.5815	0.1743	0.3803	0.0064	0.62	2076	2052	2035	±34	-2.0
8	975	0.1252	0.0038	2.6005	0.0380	6.5732	0.1918	0.3848	0.0056	0.23	2098	2049	2012	±54	-4.3
9	2217	0.1286	0.0024	2.6443	0.1250	6.8095	0.4541	0.3864	0.0230	0.99	2091	2062	2070	±33	-1.0
10	4663	0.1493	0.0027	2.9586	0.1196	7.0559	0.4322	0.3397	0.0145	0.97	1894	2105	2331	±31	18.7
11	4311	0.1258	0.0023	2.7405	0.1241	6.5429	0.3461	0.3793	0.0187	0.94	2062	2032	2039	±32	-1.1
12	477	0.1174	0.0063	2.7026	0.0513	5.9302	0.3274	0.3698	0.0075	0.19	2027	1952	1875	±96	-8.1
13	1571	0.1279	0.0018	2.5584	0.0366	6.8753	0.1600	0.3909	0.0062	0.87	2126	2092	2065	±24	-2.9
14	15034	0.1255	0.0015	2.6596	0.0921	6.5620	0.2550	0.3824	0.0127	0.94	2082	2043	2033	±21	-2.4
15	4280	0.1323	0.0026	1.7038	0.1878	15.800	3.1670	0.8291	0.1583	1.00	3816	2674	2128	±32	-79.4
<b>Sample 12537/2, plagiogneiss</b>															
1	85	0.2131	0.0068	1.7635	0.0336	16.527	0.5596	0.56788	0.0110	0.43	2896	2898	2910	±52	0.5
2	127	0.2027	0.0076	1.8672	0.0393	14.926	0.5025	0.53690	0.0110	0.19	2767	2800	2848	±56	2.8
3	208	0.2048	0.0067	1.8146	0.0332	15.352	0.4745	0.54989	0.0105	0.21	2822	2840	2863	±60	1.4
4	190	0.1356	0.0047	2.5382	0.0385	7.3021	0.2640	0.39232	0.0056	0.28	2133	2139	2158	±58	1.2
5	97	0.2060	0.0108	1.7947	0.0506	15.549	0.6865	0.55659	0.0157	0.06	2870	2833	2825	±86	-1.6
6	38	0.2047	0.0055	1.8124	0.0287	15.455	0.4501	0.55109	0.0089	0.45	2828	2842	2851	±44	0.8
7	306	0.1711	0.0058	2.3280	0.0439	10.044	0.3224	0.42980	0.0081	0.26	2303	2431	2547	±56	9.6
8	293	0.2104	0.0069	1.8315	0.0348	15.724	0.4513	0.54479	0.0108	0.15	2800	2853	2898	±53	3.4
9	554	0.2071	0.0054	1.9138	0.0487	15.065	0.7010	0.52572	0.0135	0.88	2719	2801	2871	±42	5.3
10	1595	0.1824	0.0050	1.9945	0.0530	12.750	0.6137	0.50509	0.0137	0.87	2631	2642	2660	±47	1.1
11	1778	0.1909	0.0050	1.9536	0.0487	13.621	0.5682	0.51436	0.0123	0.73	2671	2709	2737	±43	2.4
12	699	0.2019	0.0052	1.8206	0.0349	15.247	0.5023	0.54962	0.0108	0.60	2821	2822	2837	±40	0.6
13	880	0.2021	0.0038	2.0293	0.0298	13.708	0.2902	0.49157	0.0072	0.60	2576	2726	2836	±31	9.2
14	349	0.1334	0.0036	2.4990	0.0306	7.3130	0.2055	0.39792	0.0051	0.26	2159	2149	2145	±42	-0.6
15	830	0.1976	0.0036	1.8730	0.0244	14.496	0.3137	0.53216	0.0068	0.56	2749	2782	2800	±30	1.8

Примітки. Rho – кореляція між  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  та  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ . D, % – дискордантність, розраховується за  $100 \times (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) / ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .  
 Notes: Rho – correlation between  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  and  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ . D, % – discordance, calculated as  $100 \times (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) / ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .

**Таблиця 2.** Результати U-Pb ізотопного датування (LA-ICP-MS, Trinity College, Dublin) кристалів циркону з плагіомігматиту, проба 22/15  
**Table 2.** Results of U-Pb isotope dating (LA-ICP-MS, Trinity College, Dublin) of zircon from plagiomigmatite, sample 22/15

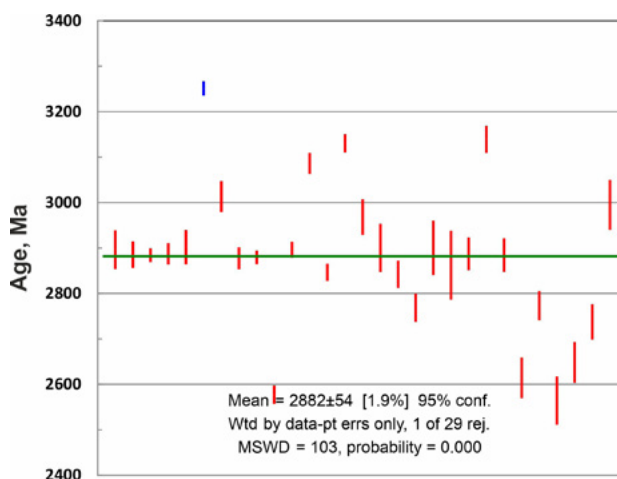
#	Isotope ratios										Isotope ages, Ma						Concentrations, ppm			
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\rho$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$		$\rho$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{\text{U}}{\text{Th}}$	U	Th	Pb
	2 SE	2 SE	2 SE	2 SE		2 SE	2 SE	2 SE	2 SE		2 SE	2 SE	2 SE	2 SE						
1	14.6495	0.7682	0.5123	0.0172	0.87	0.2081	0.0051	1.9644	0.0683	-0.28	2664	74	2786	50	2896	43	1.6	869	555	8023
2	11.3167	0.2271	0.3972	0.0059	0.50	0.2077	0.0038	2.5204	0.0372	0.29	2156	27	2549	19	2885	29	1.6	168	108	1513
3	14.2328	0.1463	0.4973	0.0050	0.65	0.2075	0.0019	2.0134	0.0201	0.41	2602	21	2765	10	2884	15	1.1	207	191	2718
4	13.9598	0.2995	0.4882	0.0074	0.74	0.2079	0.0030	2.0509	0.0310	-0.07	2563	32	2746	20	2887	23	1.9	242	135	1867
5	14.5627	0.3083	0.5012	0.0143	0.60	0.2089	0.0053	2.0050	0.0569	0.63	2617	61	2786	20	2902	38	1.3	160	127	1725
6	23.8988	0.2688	0.6650	0.0093	0.68	0.2610	0.0026	1.4996	0.0190	0.61	3292	34	3264	11	3251	16	1.2	183	147	2500
7	16.5274	0.2954	0.5435	0.0119	0.61	0.2249	0.0048	1.8454	0.0416	0.68	2797	50	2907	17	3013	34	1.1	176	161	2395
8	16.3133	0.2647	0.5709	0.0105	0.76	0.2067	0.0031	1.7581	0.0327	0.27	2910	43	2894	16	2877	24	1.1	83	75	1169
9	13.5992	0.2321	0.4794	0.0091	0.81	0.2067	0.0019	2.0899	0.0396	0.30	2524	40	2722	16	2879	15	1.2	430	367	5245
10	11.5630	0.2683	0.4895	0.0096	0.87	0.1723	0.0021	2.0542	0.0419	-0.15	2567	42	2567	22	2577	20	2.4	1170	479	6350
11	11.4517	0.1493	0.4054	0.0069	0.73	0.2082	0.0023	2.4756	0.0429	0.66	2193	32	2562	13	2896	18	4.2	536	125	1658
12	19.3955	0.3713	0.5996	0.0124	0.73	0.2351	0.0034	1.6707	0.0345	0.44	3027	50	3061	19	3086	23	1.9	257	134	2280
13	15.7593	0.3215	0.5611	0.0129	0.83	0.2027	0.0023	1.7809	0.0387	0.47	2870	53	2861	19	2846	19	1.9	457	239	3695
14	21.4756	0.4170	0.6386	0.0118	0.78	0.2418	0.0031	1.5721	0.0292	0.14	3182	46	3158	19	3130	20	2.7	515	205	3225

Примітки. Rho – кореляція між  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  та  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ . 2 SE – похибка – 2 $\sigma$ .  
 Notes. Rho is the correlation between  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  and  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ . 2SE is the standard error – 2 $\sigma$ .



**Рис. 4.** Уран-свинцева діаграма з конкордією для кристалів циркону із плагіомігматиту, проба 22/15. Нижній перетин прив'язаний до теперішнього часу. Чорним кольором показано результати, отримані в Trinity College, Дублін, Ірландія, червоним – у Curtin University, Перт, Австралія

**Fig. 4.** U-Pb concordia diagram for zircon from plagiomigmatite, sample 22/15. The lower intercept is anchored to the present. Black ovals show results obtained at Trinity College, Dublin, Ireland; red ovals show results obtained at Curtin University, Perth, Australia



**Рис. 5.** Середньозважений  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  вік для кристалів циркону із плагіомігматиту, проба 22/15

**Fig. 5.** Weighted average  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age for zircon from plagiomigmatite, sample 22/15

Результати вивчення уран-свинцевої ізотопної системи кристалів циркону наведено в табл. 1, 2 і на рис. 4, які свідчать про складну багатоетапну історію розвитку, крім того з порушеннями закритості, вірогідно, в гіпергенних умовах (найвірогідніше, захопленням урану метаміктизованими ділянками кристалів). Це зумовило значну дискордантність. Вік, розрахований

за відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , варіюється від  $3251 \pm 16$  до  $2564 \pm 53$  млн років (табл. 1, 2). За верхнім перетином конкордії дискордією, при прив'язці нижнього перетину до теперішнього часу, був обчислений вік у  $2896 \pm 68$  млн років (рис. 4). Середньозважений  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  вік становить  $2882 \pm 54$  млн років (рис. 5). Вірогідно, він відображає час формування плагіомігматиту.

## Граніти біотитові порфіроподібні кропивницького (кіровоградського, за (Єсипчук та ін., 2004)) комплексу

### Граніт порфіроподібний, проба 12534/4, гл. 50,8 м.

Граніт біотитовий порфіроподібний, сірий, масивний, слабо вивітрілий. Структура порфіроподібна з елементами мірмекітової, основної маси – гіпідіо-морфнозерниста, дрібно-середньозерниста. Порфіроподібні виділення складають 10–12 % об'єму породи, представлені кристалами калієвого польового шпату розмірами 5–10 мм (рис. 6).

Мінеральний склад породи (об. %): плагіоклаз – 35–40, калішпат – 31–36, кварц – 20–24, біотит – 12–15, мусковіт – до 1. Вторинні мінерали – серицит, мусковіт, кварц, хлорит, епідот. Акцесорні – апатит, циркон.

Плагіоклаз складає більшу частину основної маси породи, представлений олігоклазом. Нерівномірно серицитизований та пелітизований. Подекуди містить прості та полісинтетичні двійники. Розмір зерен сягає 0,2–3 мм. Проявляє ідіоморфізм по відношенню до калішпату основної маси. Присутній як пертити в порфіроподібних виділеннях калішпату.

Калішпат представлений мікрокліном, у порфіроподібних вкрапленнях інтенсивно пертитизований, містить рідкісні пойкилітові включення кварцу і біотиту, а також пертити плагіоклазу. Пертити точкові, струменисті. Досить часто порфіроподібні виділення калішпату являють собою прості двійники. Як у крупних, так і в дрібних зернах основної маси часто спостерігається типова мікроклінова ґратка. Подекуди по калішпату розвиваються одиничні зерна мусковіту. Весь калішпат частково пелітизований.

Біотит поширений в основній масі породи у вигляді лусок розміром від десятих часток міліметра до 1,8 мм. Плеохроює від світло-коричневого до темно-коричнево-бурого кольору. Поодинокі

луски хлоритизуються, одночасно відбувається опацифікація з виділенням пучків голочок рутилу.

Кварц світло-сірий, розподілений у породі досить нерівномірно, зазвичай утворює зерна різної форми і розміру (0,2–2,0 мм), а також невеликі видовжені скупчення. Згасання мозаїчне, в поодиноких зернах хвилясте.

Мусковіт розвивається у вигляді поодиноких лусок по всіх породотвірних мінералах.

Циркон утворює призматичні та коротко-призматичні кристали ( $K_{\text{вид}}$  – від 1,2 до 2,0–2,5), зрідка трапляються видовжено-призматичні з  $K_{\text{вид}}$  до 4–5. Огранення більшості кристалів просте, зумовлене комбінацією граней тупих біпірамід і граней однієї із призм призматичного поясу. В окремих кристалах у формування голівок задіяні грані гострих біпірамід. Кристалам у цілому притаманні заокруглені контури, насамперед голівки та ребра призматичного поясу. Поверхня граней рівна, блискуча, втім у багатьох шагренева.

Спостерігається широка кольорова гама: від блідо-коричневих, світло-коричневих напівпрозорих до сірувато-коричневих і коричневих непрозорих. Блиск скляний.

У полірованих зрізах більшість кристалів циркону характеризується тонкою «магматичною» зональністю (рис. 7 *a–d, i, j*). В деяких кристалах присутні релікти циркону порід субстрату (рис. 7 *e–h, k, l*). В поодиноких, зазвичай непрозорих кристалах центральні частини ізотропізовані (рис. 7 *b, c*).

Результати уран-свинцевого ізотопного датування кристалів циркону із граніту наведено в табл. 1 і на рис. 8. Дискордантність віку варіюється від 18,7 до -79,4 %, числові значення віку від  $2331 \pm 31$  до  $1875 \pm 96$  млн років. Утім, дискордантність менше ніж 3 % мають 10 із 15 датувань (див. табл. 1). Середнє зважене значення віку за відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , розраховане для 13 дат, дискордантність яких менше 10 %, становить  $2056 \pm 22$  млн років (рис. 9).

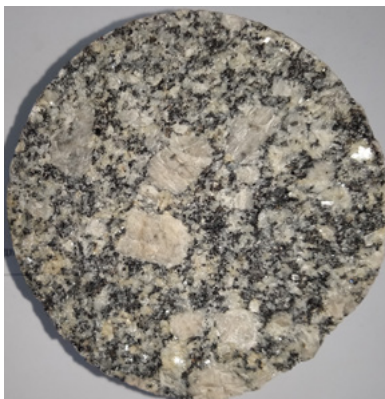
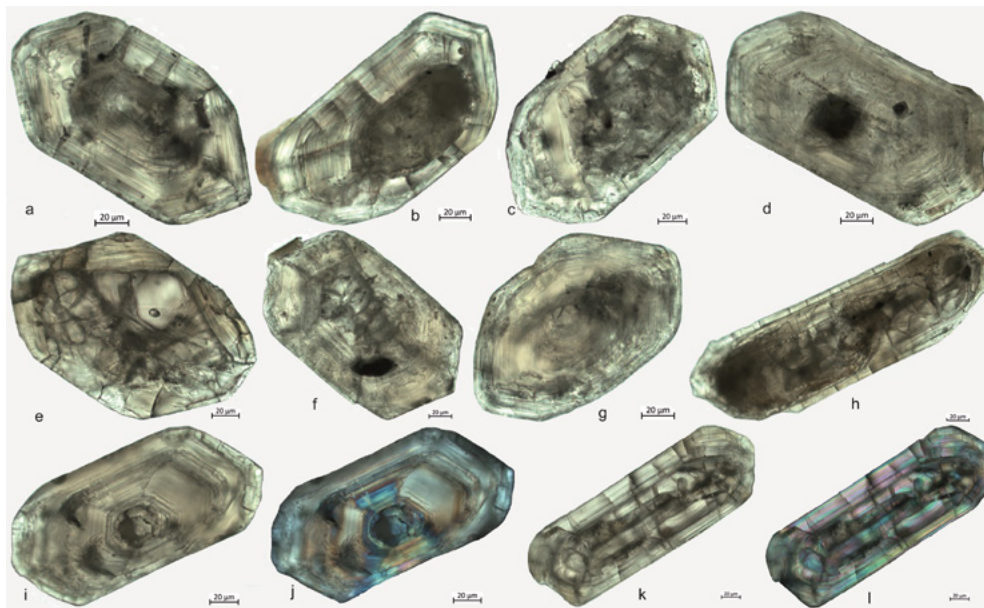
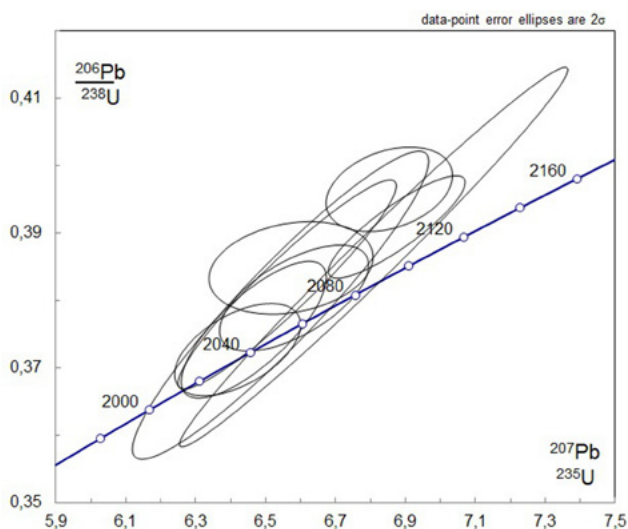


Рис. 6. Граніт порфіроподібний, проба 12534/4, діаметр керна становить 90 мм  
Fig. 6. Porphyry granite, sample 12534/4, core diameter 90 mm



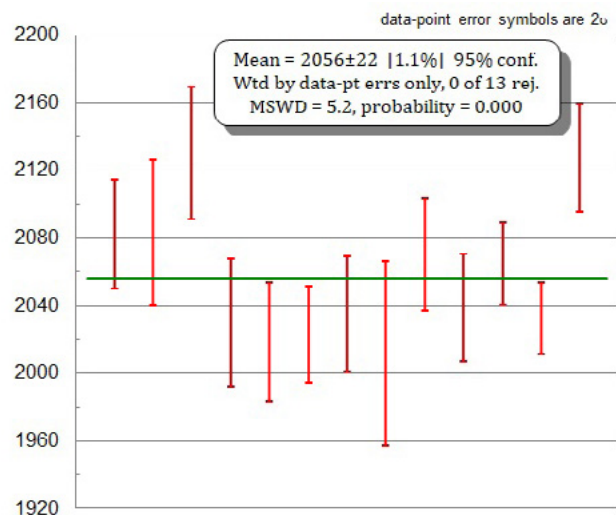
**Рис. 7.** Мікрофотографії полірованих зрізів кристалів циркону із порфіроподібного граніту, проба 12534/4 (родіонівський профіль, св. 12534, гл. 50,8 м), просвічуючий поляризаційний мікроскоп, за одного нікола (a–l, k) та з аналізатором (j, l)

**Fig. 7.** Microphotographs of polished sections of zircon crystals from porphyry granite, sample 12534/4 (Rodionivka profile, dh 12534, depth 50.8 m), transmitted polarisation microscope, with one (a–l, k) and two analysers (j, l)



**Рис. 8.** Уран-свинцева діаграма з конкордією для циркону із порфіроподібного граніту, проба 12534/4

**Fig. 8.** U-Pb diagram with concordia for zircon from porphyry granite, sample 12534/4



**Рис. 9.** Середньозважений  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  вік для кристалів циркону із порфіроподібного граніту, проба 12534/4

**Fig. 9.** Weighted average  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age for zircon from porphyry granite, sample 12534/4

**Граніт біотитовий порфіроподібний, проба 12534-15, св. 12534, гл. 119,0 м.** Структура порфіроподібна, основної маси – середньо-дрібнозерниста, алотріоморфнозерниста, антипертитова. Порфіроподібні виділення представлені калішпатом розміром 5–7 × 1,5–3 мм (рис. 10). Текстура масивна.

Мінеральний склад породи в межах шліфа (об. %): плагіоклаз – 44–50, калішпат – 11–16, кварц – 31–37, біотит – 4–7. Вторинні мінерали – серицит, мусковіт, епідот, хлорит. Акцесорні – апатит, циркон.

Плагіоклаз дрібно- та середньозернистий, представлений олігоклазом. Незначно та нерівномірно серицитизований, але досить інтенсивно пелітизований. Має антипертитову будову. Антипертити калішпату різною мірою видовжені, розташовуються субпаралельно один до одного, помірно одноманітні в кожному із зерен. У меншій частині зерен плагіоклазу антипертити поодинокі, близькі до овальної чи округлої форми. Деякі зерна плагіоклазу являють собою прості двійники, ще рідше трапляється слабо проявлене

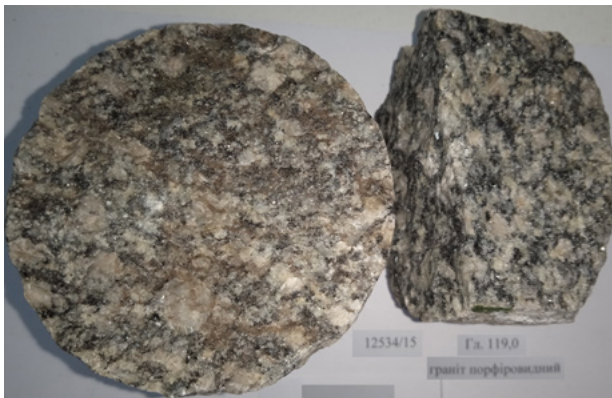
полісинтетичне двійникування. Олігоклаз не має вираженого ідіоморфізму щодо інших породоутвірних мінералів. Дуже рідко по ньому розвивається вторинний мусковіт.

Калішпат, крім порфіровидних виділень, присутній також в основній масі породи, де розподіляється дещо нерівномірно, утворює як поодинокі дрібні та середніх розмірів зерна, так і видовжені скупчення дрібних кристалів. Найбільші зерна містять у малій кількості пойкилітові вклучення кварцу, а також пертити плагіоклазу. У дрібних зернах проявляється добре виражена мікроклінова ґратка. Даний мінерал менше пелітизований порівняно з плагіоклазом.

Кварц досить рівномірно розподілений у породі, утворює зерна різної форми та розміру, а також невеликі, дещо видовжені їх скупчення. Іноді містить подібні до пойкилітових вклучення калішпату. У менших зернах має мозаїчне зґасання, у найбільших – плямисто-хвилясте.

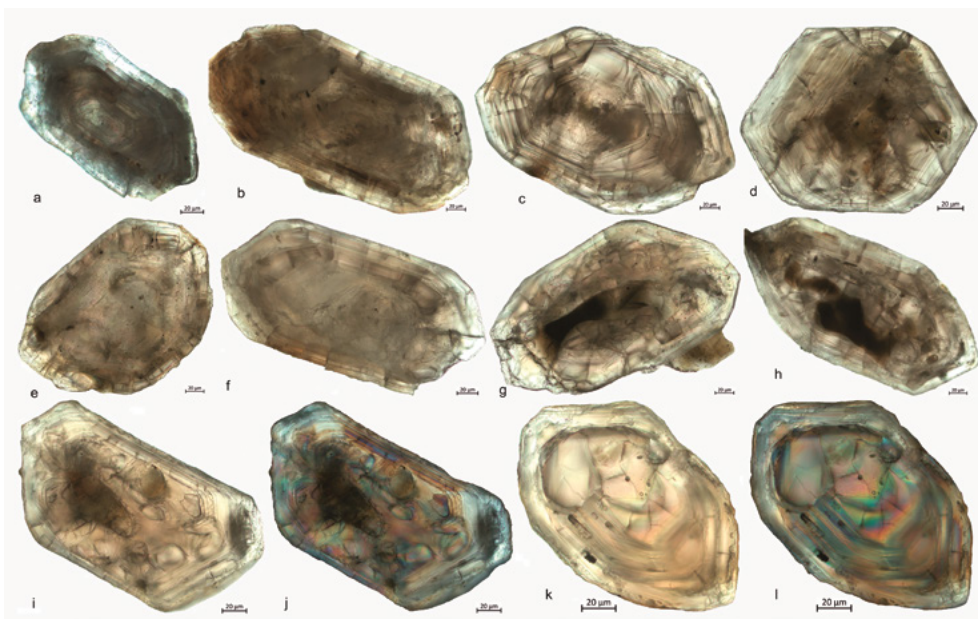
Біотит утворює переважно невеликі скупчення в основній масі породи, розмір лусок – від перших десятих часток міліметра до 1,2 мм. Плеохроює від світло-коричневого до темно-бурого кольору. До нього тяжіють дрібні кристали апатиту. Іноді біотит заміщується хлоритом, при цьому відбувається виділення голчастого рутилу. В поодиноких випадках по ньому розвивається мусковіт.

Серед кристалів циркону переважають світло-коричневі та коричневі, в підпорядкованій кількості (до 20 %) присутні коричнювато- та світло-рожеві. Блиск скляний. За видовженням кристали коротко-призматичні та призматичні ( $K_{\text{вид}}$  – від 1,0 до 2,0, зрідка – до 2,5). Огранення кристалів переважно ґіацинтового типу, зумовлене комбінацією граней однієї, зрідка обох тупих біпірамід та однієї із граней призматичного поясу. Для більшості кристалів характерні заокруглені контури. Заокругленими є як голівки кристалів, так і ребра призматичного поясу.



**Рис. 10.** Граніт порфіроподібний, проба 12534/15, діаметр зерна становить 90 мм

**Fig. 10.** Porphyry granite, sample 12534/15, core diameter 90 mm



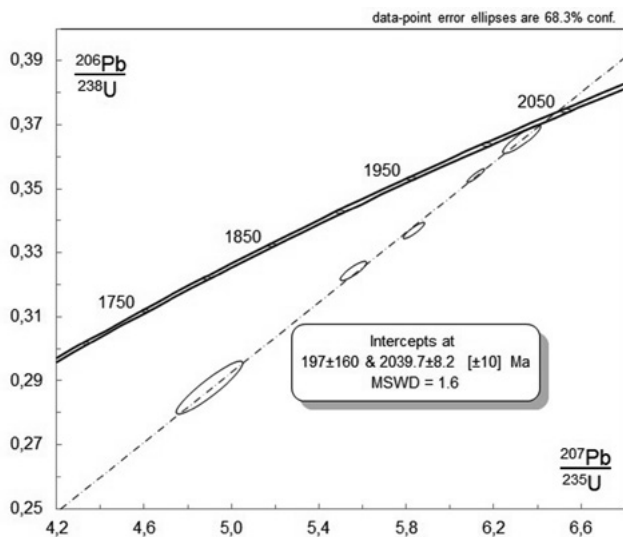
**Рис. 11.** Мікрофотографії полірованих зрізів кристалів циркону із порфіроподібного граніту, проба 12534/15, родіонівський профіль, св. 12534, гл. 119 м, просвічуючий поляризаційний мікроскоп, за одного ніколя (a–l, k) та у схрещених ніколях (j, l)

**Fig. 11.** Microphotographs of polished sections of zircon crystals from porphyry-like granite, sample 12534/15, Rodionivka profile, dh. 12534, depth 119 m, transmission polarising microscope, with one analyser (a–l, k) and in crossed analysers (j, l)

**Таблиця 3.** Результати датування (SIMS, Australian National University, Canberra) кристалів циркону із граніту порфіроподібного, проба 12534/15**Table 3.** Results of U-Pb dating (SIMS, Australian National University, Canberra) of zircon from porphyry granite, sample 12534/15

Spot #	Concentration, ppm				$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	Isotope ratio measured			Isotope ratio calculated			$\rho$	Isotope age, Ma					D, %			
	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{208}\text{Pb}^*$	U	Th		$\frac{^{204}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	±%	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$		±%	(1)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2SE	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		2SE	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	2SE
1	242	77	870	942	1.12	2.1E-5	0.1246	0.315	5.56	0.7	0.32	0.6	0.86	1811	±10	2019	±6	1765	±17	+12	
2	988	496	3249	5405	1.72	4.6E-6	0.1254	0.497	6.12	0.4	0.35	0.4	0.92	1954	±7	2033	±3	1969	±13	+4	
3	532	82	1838	907	0.51	6.6E-6	0.1257	0.153	5.83	0.6	0.34	0.5	0.90	1872	±8	2037	±4	1951	±33	+9	
4	211	92	672	975	1.50	4.3E-5	0.1261	0.433	6.33	0.9	0.37	0.8	0.89	2008	±14	2037	±7	2024	±23	+2	
5	72	19	290	235	0.84	2.1E-4	0.1263	0.264	4.90	2.1	0.29	1.9	0.92	1631	±27	2006	±14	1714	±40	+21	

Примітки. Похибки вказані на рівні 1 $\sigma$ ; Pb\* – вимірний вміст відповідного ізотопу. (1) частка радіогенного ізотопу свинцю, скоригованого на вимірний  $^{204}\text{Pb}$ . Rho – кореляція між  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  та  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ . D, % – дискордантність, розраховується за  $100 \times (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) / ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .  
Notes. Errors are at 1 $\sigma$ ; Pb\* – indicates the measured amount of the respective isotope. (1) Common Pb corrected using measured  $^{204}\text{Pb}$ . Rho – correlation between  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  and  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ . D, % – discordance, calculated as  $100 \times (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) / ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .

**Рис. 12.** Уран-свинцева діаграма з конкордією для кристалів циркону із порфіроподібного граніту, проба 12534/15**Fig. 12.** U-Pb diagram with concordia for zircon from porphyry granite, sample 12534/15

Втім, грані добре розвинені, їх поверхня зазвичай шагренева, в окремих кристалах гладенька, блискуча. Кристали дрібні, основна маса циркону сконцентрована у фракції дрібнішій за 0,050 мм.

У полірованих зрізах більшість кристалів полізональні (тонкозональні, характерні для магматичних порід (рис. 11 a–d)), всередині окремих кристалів виявляються ядра (рис. 11 g–l), які сильно тектонізовані, розбиті численними тріщинками та заліковані цирконом, синпетрогенним граніту. В багатьох кристалах центральні частини азональні (рис. 11 e, f), а зовнішні їх ділянки мають виразну полізональну структуру.

Наявність сильно тектонізованих ядер циркону дозволяє припустити, що материнська порода перед плавленням (утворенням гранітного розплаву) зазнала інтенсивної деформації.

Аналітичні результати датування полізональних кристалів циркону методом SIMS наведено в табл. 3. На діаграмі з конкордією (рис. 12) лінія регресії, розрахована за аналітичними даними, поданими в табл. 3, перетинає конкордію, що відповідає віку  $2039,7 \pm 8,2$  млн років. Це добре узгоджується з віковим інтервалом формування гранітів кропивницького комплексу.

### Плагіогнейси родіонівської світи

**Плагіогнейс амфібол-біотитовий, проба 12537/2, св. 12537, гл. 31,5 м.** Порода темно-сіра, дрібнозерниста, текстура слабо проявлена, смугаста (рис. 13), на поверхні спостерігаються дрібні плями з червонуватим відтінком. Під мікроскопом проявляється смугастий розподіл темноколірних мінералів, зі смугами збагаченими: 1) біотитом і незмінним ортитом; 2) біотитом, амфіболом і слабо заміненим ортитом; 3) амфіболом і зміненим ортитом. Між смугами немає чітко виражених контактів. Мікроструктура породи нематолепідогранобластова. Мінеральний склад (об. %): плагіоклаз – 50–56, кварц – 38–43, біотит – 4–6, ортит – 1, амфібол – менше ніж 1, хлорит, серицит, цоїзит. Акцесорні – апатит, циркон.

Плагіоклаз представлений олігоклазом, розмір зерен сягає 0,2–0,8 мм. Нерівномірно заміщується серицитом. Подекуди присутні полісинтетичні двійники та проявляється досконала спайність. Є тенденція до того, що у смугах,



**Рис. 13.** Плагіогнейс амфібол-біотитовий, проба 12537/2, діаметр керна становить 90 мм

**Fig. 13.** Amphibole-biotite plagiogneiss, sample 12537/2, core diameter 90 mm

збагачених на амфібол, двійники стають більш чіткими та в них збільшується кількість зерен з вираженою досконалою спайністю.

Кварц досить рівномірно розподілений у породі, проте простежується незначне зниження його кількості поблизу амфіболів. Утворює найкрупніші зерна в даній породі, їх розмір загалом варіюється від 0,1 до 1,2 мм. Згасання мінералу мозаїчне, іноді блокове.

Біотит дещо нерівномірно розподілений у породі. Формує окремі луски розміром до 0,8–1,0 мм. Плеохроює від світло- до бурувато-коричневого кольору. Містить рідкісні плеохроїчні дворики. Місцями заміщується блідо-зеленим хлоритом з аномальними темно-сіро-чорними, інколи темно-сіро-коричневими кольорами інтерференції.

Амфібол представлений роговою обманкою, що утворює окремі видовжені зерна неправильно-таблицької форми. Плеохроює від жовтувато-світло-зеленого або світло-коричнювато-зеленого до зеленого та бурувато-зеленого кольору. Деякі зерна мають нерівномірне забарвлення. В поодиноких випадках на краях її зерен кристалізуються радіально-променеві агрегати амфіболу актиноліт-тремолітового ряду. Присутні також поодинокі зерна синювато-зеленого натрієвого амфіболу, що асоціюють, як правило, з біотитом.

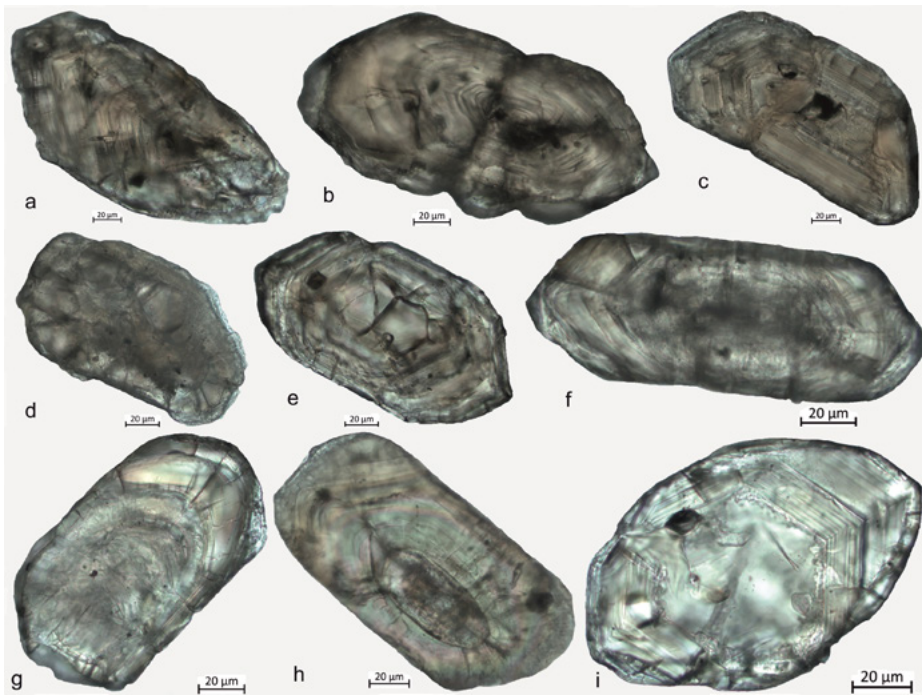
Ортит переважно утворює ксеноморфні зерна неправильної форми. Досить рівномірно розподілений у породі. Заміщується непрозорою буро-червоною речовиною, особливо зміненими є зерна, що асоціюють з амфіболом.

Циркон спостерігається у широкій гамі відносно дрібних (переважна більшість до 0,040 мм, зрідка – понад 0,1 мм) кристалів за кольором, видовженням та ограненням. За кольором переважають світло-коричневі та коричневі напівпрозорі, в підпорядкованій кількості наявні світло-рожеві прозорі кристали. За видовженням присутні призматичні з  $K_{\text{вид}} 1,5-2,5$ , видовжено-призматичні з  $K_{\text{вид}} 2,5-3$  та як поодинокі списоподібні з  $K_{\text{вид}}$  до 5. Огранення більшості кристалів обумовлено комбінацією граней обох призм і граней декількох біпірамід, у тому числі гострих. Як поодинокі трапляються кристали цирконового та гіацинтового типів. При цьому в більшості кристалів контури (ребра та голівки) дещо заокруглені, поверхня граней шагренева до дрібноямчастої.

У полірованих зрізах для більшості кристалів характерна тонка «магматична» зональність (рис. 14 *a-c, f-i*), в центральних частинах деяких кристалів відмічаються азональні ділянки (ядра) (рис. 14 *e, i*). Оболонки (оболонка 1), що наростають на зональний циркон, азональні (рис. 14 *b, f, g*). Можна припустити, що між кристалізацією тонкозонального циркону й азональної оболонки 1 існувала перерва, про що можуть свідчити кристали (рис. 14 *a, c*).

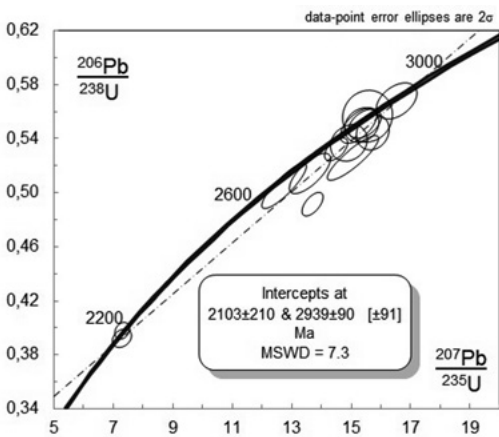
Оболонки 2 малопотужні, присутні не на всіх кристалах і найчастіше розвиваються на голівках кристалів (рис. 14 *a, b, d, f-i*).

Аналітичні результати ізотопного датування кристалів циркону із амфібол-біотитового плагіогнейсу наведено в табл. 1 (проба 12537/2) та на рис. 15.



**Рис. 14.** Мікрофотографії полірованих зрізів кристалів циркону із амфібол-біотитового плагіогнейсу, проба 12537/2, родіонівський профіль, св. 12537, гл. 31,5 м, просвічуючий поляризаційний мікроскоп, за одного ніколя

**Fig. 14.** Microphotographs of polished sections of zircon crystals from amphibole-biotite plagiogneiss, sample 12537/2, Rodionivka profile, Dh. 12537, depth 31.5 m, transmission polarizing microscope, at one analyser



**Рис. 15.** Уран-свинцева діаграма з конкордією для кристалів циркону із амфібол-біотитового плагіогнейсу, проба 12537/2

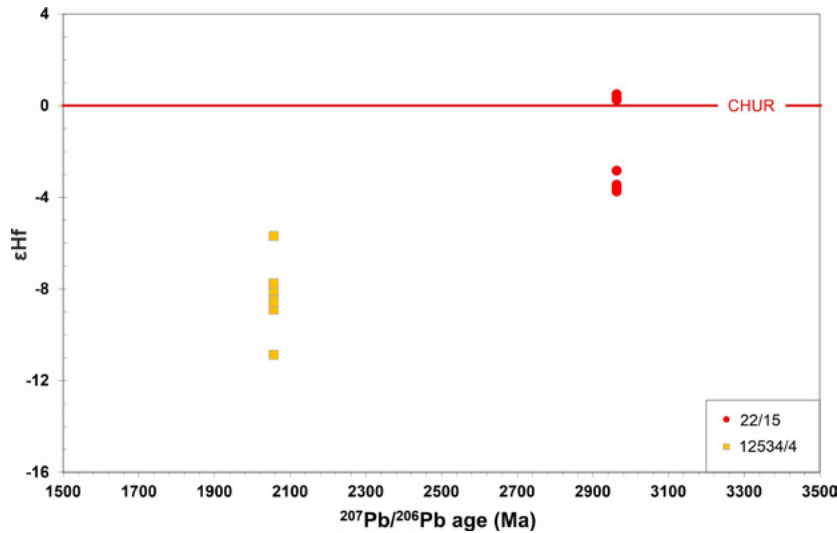
**Fig. 15.** U-Pb diagram with concordia for zircon from amphibole-biotite plagiogneiss, sample 12537/2

Як впливає з табл. 1 та видно на рис. 15, в амфібол-біотитовому плагіогнейсі (проба 12537/2) родіонівського профілю присутні як давні мезоархейські кристали циркону (вік від 2910 до 2547 млн років), так і значно молодші (два кристали віком 2145 і 2158 млн років) палеопротерозойські (вік за ізотопним відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ), вірогідно, накладені в результаті процесів метаморфізму та гранітоутворення.

### Ізотопний склад гафнію

Ізотопний склад гафнію визначено в кристалах циркону з двох проб: проба 22/15 – плагіомігматит; проба 12534/4 – граніт порфіроподібний. Початкові значення  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  та  $\epsilon\text{Hf}$  вираховували для віку у 2,9 млрд років для першої проби та 2,05 млрд років – для другої. Результати визначення ізотопного складу гафнію подано на рис. 16 та в табл. 4.

Циркон з проби 22/15 утворює дві групи кристалів, що чітко розрізняються за ізотопним складом гафнію. Кристали першої групи мають ювенільний ізотопний склад:  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0,280884 \pm 0,000005$  та  $\epsilon\text{Hf} = 0,4 \pm 0,3$ . Гафній в кристалах другої групи менш радіогенний:  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0,280779 \pm 0,000018$  та  $\epsilon\text{Hf} = -3,4 \pm 0,6$ . Кристали циркону з проби 12534/4 значно варіюються за ізотопним складом гафнію:  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  від 0,281164 до 0,281310 (середньозважене  $0,281242 \pm 0,000022$ ),  $\epsilon\text{Hf}$  від -5,7 до -10,9 (середньозважене  $-8,3 \pm 0,4$ ). Модельні віки за моделлю кислої кори для кристалів першої групи з плагіомігматиту становлять близько 3300 млн років, для кристалів другої групи – майже 3500 млн років, а для цирконів з порфіроподібного граніту – близько 3000 млн років.



**Рис. 16.** Ізотопний склад гафнію в цирконах з плагіомігматиту (проба 22/15) та порфіровидних гранітів (проба 12534/4)

**Fig. 16.** Hf isotopic composition in zircon from plagiomigmatite (sample 22/15) and porphyry granite (sample 12534/4)

**Таблиця 4.** Ізотопний склад гафнію в цирконах із кристалічних порід Інгільського району

**Table 4.** Hafnium isotopic composition in zircon from crystalline rocks of the Ingul region

Spot #	Isotope ratios							Model ages, Ma		
	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 1\text{SE}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_T$	$\pm \text{SE}$	$\epsilon\text{Hf}_T$	$\pm 2\text{SE}$	Felsic crust	Mafic crust
<b>Sample 22/15, plagiomigmatite</b>										
1	0.280826	0.000999	0.000043	0.028057	0.280769	0.000009	-3.7	0.7	3520	3925
2	0.280929	0.000803	0.000020	0.026000	0.280883	0.000009	0.3	0.7	3306	3555
3	0.280948	0.001055	0.000012	0.032763	0.280888	0.000008	0.5	0.6	3297	3541
4	0.280808	0.000548	0.000013	0.014379	0.280777	0.000008	-3.4	0.6	3505	3898
5	0.280840	0.000812	0.000030	0.024852	0.280794	0.000008	-2.8	0.6	3473	3843
6	0.280894	0.000226	0.000002	0.006291	0.280881	0.000008	0.3	0.6	3311	3563
7	0.280839	0.001173	0.000008	0.033759	0.280772	0.000009	-3.6	0.7	3514	3914
<b>Sample 12534/4, porphyry granite</b>										
1	0.281311	0.001659	0.000020	0.050963	0.281246	0.000008	-8.0	0.6	2994	3669
2	0.281201	0.000931	0.000025	0.028573	0.281164	0.000018	-10.9	1.3	3145	3928
3	0.281287	0.001162	0.000042	0.035168	0.281242	0.000010	-8.1	0.7	3001	3681
4	0.281278	0.001034	0.000006	0.033206	0.281237	0.000009	-8.3	0.7	3009	3696
5	0.281297	0.001370	0.000037	0.039934	0.281244	0.000010	-8.0	0.7	2998	3676
6	0.281326	0.001888	0.000030	0.062668	0.281252	0.000009	-7.7	0.7	2982	3650
7	0.281392	0.002084	0.000045	0.061884	0.281310	0.000010	-5.7	0.7	2874	3465
8	0.281276	0.001439	0.000033	0.045590	0.281220	0.000008	-8.9	0.6	3042	3752
9	0.281274	0.001174	0.000017	0.040189	0.281229	0.000007	-8.6	0.5	3026	3724

## Обговорення результатів

За результатами уран-свинцевого ізотопного датування кристалів циркону із гранітоїдів і метаморфічних порід (гнейсів), поширених в Інгільському районі Українського щита, з'ясовано, що практично всі породи, в тому числі плагіомігматити інгулецького комплексу, містять палеопротерозойські кристали (генерації кристалів) цього мінералу, формування яких, вочевидь, обумовлене процесами метаморфізму та гранітоутворення кривинського (кіровоградського, за (Єсипчук

та ін., 2004)) етапу. Порфіроподібні граніти, розкриті свердловинами родіонівського профілю, сформувалися в палеопротерозої (2060–2040 млн років тому) внаслідок плавлення архейської корової речовини. Їх вік збігається з віковим інтервалом формування гранітоїдів кривинського комплексу (Щербак Д.Н. і др., 1995; Щербак Н.П. і др., 2008; Шумлянський, Петренко, 2015; Баран та ін., 2024; Степанюк та ін., 2024), хоча за ізотопними характеристиками вони різко відрізняються (усні повідомлення авторів).

Кристали циркону з плагіомігатитів мають архейський вік близько 2900 млн років. При цьому деякі з кристалів значно давніші, що, вочевидь, вказує на їх детритове або успадковане походження. Про гетерогенність популяції циркону в цій породі свідчить і значна варіабільність ізотопного складу гафнію – деякі кристали мають мантийні ізотопні характеристики, а деякі засвідчують походження з більш давніх корових порід.

Амфібол-біотитові плагіогнейси спасівської світи (родіонівського профілю) головним чином містять кристали давнього архейського віку. Із проаналізованих 15 кристалів вік 13 із них є давнішим за 2,5 млрд років. При цьому практично всі кристали розташовуються на дискордії, яка проходить через дві події – віком  $2939 \pm 90$  млн років та  $2103 \pm 210$  млн років (див. рис. 15). Давніша подія відповідає часу утворення породи та близька, наприклад, до часу утворення ендербітів ташлицького комплексу (Пономаренко та ін., 2021), тоді як молодша припадає на час палеопротерозойського метаморфізму амфіболітової фації та гранітоутворення кропивницького (кіровоградського) етапу. Таким чином, час початкової кристалізації протоліту сучасних амфібол-біотитових плагіогнейсів спасівської світи становить близько 2,9 млрд років.

Він також відповідає часу утворення розповсюджених у районі плагіомігатитів та ендербітів, а також раніше отриманим даним для цирконів з порід інгуло-інгулецької серії (Белєвцев та ін., 1971; Щербак Д.Н. и др., 1995; Артеменко и др., 2019).

## Висновки

1. Породи, що складають породну асоціацію Інгульського району, в тому числі фундаменту – плагіомігатити та гнейси інгулецького комплексу, зазнали структурно-метаморфічних перетворень в палеопротерозої (кропивницький етап).
2. Порфіроподібні граніти, що розвиваються по породах спасівської світи, сформувалися у палеопротерозої (2060–2040 млн років тому) впродовж кропивницького етапу. Отримані відомості про ізотопний склад гафнію в цирконах підтверджують можливість розвитку порфіроподібних гранітів по породах спасівської світи.
3. Гнейси та плагіомігатити містять переважно кристали циркону, сформовані в археї. Ці дані разом з отриманими раніше результатами інших авторів вказують на мезо-неоархейський, а не палеопротерозойський вік інгуло-інгулецької серії.

У геологічній будові Інгульського мегаблоку найбільш поширеними є супракрустальні утворення інгуло-інгулецької серії, по яких розвиваються гранітоїди кропивницького (кіровоградського) та новоукраїнського комплексів. У його східній частині присутні архейські породи аульської та конкської серій, по яких розвиваються плагіогранітоїди, виокремлені в інгулецький мезоархейський комплекс.

Методами оптичної мікроскопії вивчено анатомію кристалів циркону із плагіомігатиту інгулецького комплексу, плагіогнейсу спасівської світи інгуло-інгулецької серії та порфіроподібних гранітів кропивницького (кіровоградського) комплексу. Виконано їх датування уран-свинцевим ізотопним (LA-ICP-MS та SIMS) методом, а також визначено ізотопний склад гафнію в кристалах циркону із плагіомігатиту та порфіроподібного граніту. Вік кристалів циркону із плагіомігатиту, розрахований за відношенням  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , варіюється від  $3251 \pm 16$  млн років до  $2564 \pm 53$  млн років. Плагіогнейс спасівської світи головним чином містить кристали циркону архейського віку. Із проаналізованих 15 кристалів вік 13 із них є давнішим за 2,5 млрд років. При цьому практично всі кристали розташовуються на дискордії, яка проходить через дві події – віком  $2939 \pm 90$  млн років та  $2103 \pm 210$  млн років. Порфіроподібні граніти, що розвиваються по породах спасівської світи, сформувалися у палеопротерозої (2060–2040 млн років тому) впродовж кропивницького (кіровоградського) етапу за рахунок давньої корової речовини. Про це свідчать численні різномірні релікти (ядра) циркону порід субстрату та ізотопний склад гафнію ( $\epsilon\text{Hf}$  від -5,7 до -10,9, модельний вік за моделлю кислоти – близько 3000 млн років).

## Список літератури

- Артеменко Г.В., Шумлянський Л.В., Хоффманн А., Беккер А.Ю. Возраст пород области сноса для кварцитов родионской свиты ингуло-ингулецкой серии (Желтянский участок Правобережного района). *Доп. НАН України*. 2019. № 12. С. 65–74.
- Баран А.М., Висоцький О.Б., Довбуш Т.І., Ковтун О.В., Степанюк Л.М., Яськевич Т.Б. Уран-свинцевий ізотопний вік за монацитом гранітоїдів Кропивницького масиву, на прикладі кар'єра с. Суботці (Інгульський мегаблок Українського щита). *Геохімія та рудоутворення*. 2024. Вип. 45. С. 54–63. <https://doi.org/10.15407/gof.2024.45.054>
- Белєвцев Я.М., Рудницький П.М., Сухинін О.М., Єгоров Ю.П., Олейник О.А. Про стратиграфію та структуру центральної частини Українського щита. *Геол. журн.* 1971. Т. 31, № 2 (137). С. 114–128.
- Бобров О.Б., Степанюк Л.М., Паранько І.С., Пономаренко О.М., Шумлянський Л.В., Дьюйм Б. Генезис та вік циркону із кварциту «латівського» горизонту криворізької серії Українського щита. *Мінерал. журн.* 2011. Т. 33, № 1. С. 30–40.
- Державна геологічна карта України. М-6 1:200 000. Центральноукраїнська серія. Аркуш М-36-XXXII (Новоукраїнка). Київ: УкрДГРІ, 2001.
- Державна геологічна карта України. М-6 1:200 000. Центральноукраїнська серія. Аркуш М-36-XXXIV (Жовті Води), L-36-IV (Кривий Ріг). КП «Південукргеологія». Криворізька КГП. Київ, 2002.

- Державна геологічна карта України. М-6 1:200 000. Центрально-українська серія. Аркуш L-36-II (Вознесенськ). Київ, 2004.
- Єсипчук К.Ю., Бобров О.Б., Степанюк Л.М., Щербак М.П., Глеваський Є.Б., Скобелев В.М., Дранник А.С., Гейченко М.В. Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита. Пояснювальна записка. Київ: УкрДГРІ, 2004. 30 с.
- Пономаренко О.М., Лісна І.М., Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В., Мінеєва В.М., Заяць О.В., Сьомка Л.В., Гулько В.В., Коваленко О.О. До питання про вік чарнокітоїдів ташлицького комплексу (Інгульський мегаблок Українського щита). *Мінерал. журн.* 2021. Т. 43, № 3 С. 73–84. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.03.000/>
- Степанюк Л.М., Бобров О.Б., Паранько І.С., Пономаренко О.М., Сергеев С.А. Генезис та вік циркону із амфіболіту новокриворізької світи Криворізької структури. *Мінерал. журн.* 2011а. Т. 33, № 3. С. 69–76.
- Степанюк Л.М., Паранько І.С., Пономаренко О.М., Довбуш Т.І., Висоцький О.Б. Уран-свинцевий вік кластогенного монациту із метапісковнику скелюватської світи Криворізької структури. *Мінерал. журн.* 2011б. Т. 33, № 4. С. 80–90.
- Степанюк Л.М., Висоцький О.Б., Баран А.М., Ковтун О.В., Довбуш Т.І., Коваленко Н.О., Котвіцька І.М. Ізотопна геохронологія гранітоїдів кропивницького комплексу, на прикладі Лозуватського кар'єра. *Геохімія та рудоутворення.* 2024. Вип. 45. С. 44–53. <https://doi.org/10.15407/gof.2024.45.044>
- Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В., Хоффманн А., Хоффман М., Ковалик А., Беккер А. Про мезо-архейський вік кластогенного циркону із метатеригенних утворень скелюватської та саксаганської світи Криворізької структури (за даними U-Pb датування). *Мінерал. журн.* 2020. Т. 42, № 2. С. 46–62. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.42.02.046>
- Стратиграфические разрезы докембрия Украинского щита. Щербак Н.П., Єсипчук К.Е., Берзенин Б.З., Глеваський Є.Б., Дранник А.С., Пийяр Ю.К., Скаржинская Т.А., Соловицкий В.Н., Этингоф И.М., Клочков В.М., Решетняк В.В. Киев: Наукова думка, 1985. 168 с.
- Щербак Д.Н., Пономаренко А.Н., Макаренко И.Д. Геохронология гранитоидов Ингуло-Ингулецкого мегаблока Украинского щита. *Геохимия и рудообразование.* 1995. Вып. 1. С. 74–88.
- Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Лесная И.М., Пономаренко А.Н., Шумлянський Л.В. Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой. Киев: Наукова думка, 2008. 239 с.
- Щербачов І.Б. Петрологія Українського щита. Львов: ЗУКЦ, 2005. 366 с.
- Шумлянський Л.В., Петренко О.В. Палеопротерозойський гранітоїдний магматизм Інгульського району Українського щита. *Геол.-мін. вісн. Криворізького нац. ун-ту.* 2015. № 1 (33). С. 80–87.
- Artemenko H., Shumlyansky L., Chew D., Drakou F., Dhuime B., Moreira H. and Butyrin V. The Relationships between Greenstone Belts and the Kryvyi Rih–Kremenchuk Basin in the Middle Dnieper Domain of the Ukrainian Shield Revealed by Detrital Zircon. *Geosciences*, 2024. Vol. 14. P. 254. <https://doi.org/10.3390/geosciences14100254>
- Bouvier A., Vervoort J.D. and Patchett P.J. The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. Vol. 273. P. 48–57.
- Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E. The application of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry to in-situ U–Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.* 2004. Vol. 211. P. 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>
- Marsh J.H., Jørgensen T.R.C., Petrus J.A., Hamilton M.A. and Mole D.R. U–Pb, trace element, and hafnium isotope composition of the Maniitsoq zircon: A potential new Archean zircon reference material. *Goldschmidt, Barcelona*, 18–23 August 2019. P. 2161. <https://goldschmidtabstracts.info/2019/2161>
- Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J. and Hergt J. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *J. Anal. At. Spectrom.* 2011. Vol. 26. P. 2508–2518. <https://doi.org/10.1039/C1JA10172B>
- Pointon M.A., Chew D.M., Ovtcharova M., Sevastopulo G.D. and Crowley O.G. New high-precision U–Pb dates from western European Carboniferous tuffs; implications for time scale calibration, the periodicity of late Carboniferous cycles and stratigraphical correlation. *J. Geol. Soc. London.* 2012. Vol. 169. P. 713–721. <https://doi.org/10.1144/jgs2011-092>
- Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hancher J.M., Horstwood M.S., Morris G.A., Nasdala L. and Norberg N. Plešovice zircon – a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.* 2008. Vol. 249. P. 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Söderlund U., Patchett J.P., Vervoort J.D., Isachsen C.E. The <sup>176</sup>Lu decay constant determined by Lu–Hf and U–Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. Vol. 219. P. 311–324. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00012-3)
- Stern R.A., Bodorkos S., Kamo S.L., Hickman A.H. and Corfu F. Measurement of SIMS Instrumental Mass Fractionation of Pb Isotopes During Zircon Dating. *Geostand. Geoanal. Res.* 2009. Vol. 33. P. 145–168. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2009.00023.x>
- Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J.C. and Spiegel W. Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter.* 1995. Vol. 19. P. 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>
- Williams I.S. U–Th–Pb Geochronology by Ion Microprobe. *Review in Economic Geology.* 1998. Vol. 7. P. 1–35.

## References

- Artemenko H., Shumlyansky L., Chew D., Drakou F., Dhuime B., Moreira H. and Butyrin V. 2024. The Relationships between Greenstone Belts and the Kryvyi Rih–Kremenchuk Basin in the Middle Dnieper Domain of the Ukrainian Shield Revealed by Detrital Zircon. *Geosciences*, 14, 254. <https://doi.org/10.3390/geosciences14100254>
- Artemenko G.V., Shumlyansky L.V., Hoffmann A. and Bekker A. Yu. 2019. Age of the source rocks for quartzite of the Rodionivka Suite of the Inhul-Inhulets Series (Zhovte area of the Pravoberezhnyi region). *Reports of the National Academy of Sciences*, 12, 65–74 (in Russian).
- Baran A.M., Vysotskyi O.B., Dovbush T.I., Kovtun O.V., Stepanyuk L.M. and Yasykevych T.B. 2024. The uranium-lead monazite isotopic age of granitoids of the Kirovohrad massif, on the example of the Subottsi village open pit (Inhul domain of the Ukrainian Shield). *Geochem. and Ore Formation*, 45, 54–62. <https://doi.org/10.15407/gof.2024.45.054> (in Ukrainian).
- Belevtsev Ya.M., Rudnytskyi P.M., Sukhynin O.M., Yehorov Yu.P. and Oleynik O.A. 1971. On the stratigraphy and structure of the central part of the Ukrainian Shield. *Geologičnij žurnal*, 31, 2 (137), 114–128 (in Ukrainian).
- Bobrov O.B., Stepanyuk L.M., Paranko I.S., Ponomarenko O.M., Shumlyansky L.V. and Dhuime B. 2011. Genesis and Age of Zircon from “Lativka” Horizon of Kryvyi Rig Series of the Ukrainian Shield. *Mineralogical Journal*, 33, 1, 30–40 (in Ukrainian).
- Bouvier A., Vervoort J.D. and Patchett P.J. 2008. The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 273, 48–57.
- Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E. 2004. The application of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry to in-situ U–Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, 211, 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>

- Marsh J.H., Jørgensen T.R.C., Petrus J.A., Hamilton M.A. and Mole D.R. 2019. U-Pb, trace element, and hafnium isotope composition of the Maniitsoq zircon: A potential new Archean zircon reference material. *Goldschmidt*, Barcelona, 18–23 August 2019. P. 2161. <https://goldschmidtabstracts.info/2019/2161>
- Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J. and Hergt J. 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *J. Anal. At. Spectrom.*, 26, 2508–2518. <https://doi.org/10.1039/C1JA10172B>
- Pointon M.A., Chew D.M., Ovtcharova M., Sevastopulo G.D. and Crowley O.G. 2012. New high-precision U–Pb dates from western European Carboniferous tuffs; implications for time scale calibration, the periodicity of late Carboniferous cycles and stratigraphical correlation. *J. Geol. Soc. London*, 169, 713–721. <https://doi.org/10.1144/jgs2011-092>
- Ponomarenko O.M., Lisna I.M., Stepanyuk L.M., Shumlyansky L.V., Mineeva V.M., Zayats O.V., Syomka L.V., Hulko V.V. and Kovalenko O.O. 2021. On the Age of the Charnokitoids of the Tashlyk Complex of the Inhul Region of the Ukrainian Shield. *Mineralogical Journal*, 43, 3, 73–84. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.03.073> (in Ukrainian).
- Precambrian stratigraphic sections of the Ukrainian Shield. Shcherbak N.P., Esypchuk K.Yu., Berzenin B.Z., Glevassky E.B., Drannik A.S., Piyar Yu.K., Skarzhinskaya T.A., Solovitsky V.N., Etingov I.M., Klochkov V.M. and Reshetnyak V.V. 1985. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian).
- Shcherbak D.N., Ponomarenko A.N. and Makarenko I.D. 1995. Geochronology of granitoids of the Ingul-Ingulets megablock of the Ukrainian Shield. *Geochemistry and Ore Formation*, 21, 74–88 (in Russian).
- Shcherbak N.P., Artemenko G.V., Lesnaya I.M., Ponomarenko A.N. and Shumlyansky L.V. 2008. Geochronology of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Proterozoic. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian).
- Shcherbakov I.B. 2005. Petrology of the Ukrainian Shield. Lviv: ZUKTS press. (in Russian).
- Shumlyansky L.V., Petrenko O.V. 2015. Palaeoproterozoic granitoid magmatism of the Ingul terrain, Ukrainian Shield/ *Geology and Mineralogy Bulletin of Kryvyi Rih National University*, 1 (33), 80–87 (in Ukrainian).
- Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hancher J.M., Horstwood M.S., Morris G.A., Nasdala L. and Norberg N. 2008. Plešovice zircon – a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, 249, 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Söderlund U., Patchett J.P., Vervoort J.D., Isachsen C.E. 2004. The <sup>176</sup>Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 219, 311–324. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00012-3)
- State geological map of Ukraine. Scale 1:200,000. Central Ukrainian series. Sheet M-36-XXII (Novoukrainka). 2001. Kyiv: UkrDGRI (in Ukrainian).
- State geological map of Ukraine. Scale 1:200,000. Central Ukrainian series. Sheet M-36-XXXIV (Zhovti Vody), L-36-IV. (Kryvyi Rih). 2002. Kyiv (in Ukrainian).
- State geological map of Ukraine. Scale 1:200,000. Central Ukrainian series. Sheet L-36-II (Voznesensk). 2004. Kyiv (in Ukrainian).
- Stepanyuk L.M., Bobrov O.B., Paranko I.S., Ponomarenko O.M., Sergeev S.A. 2011a. Genesis and age of zircon from amphibolite of the Novokryvorizhskaya stele of the Kryvorizhskaya structure. *Mineralogical Journal*, 33, 3, 69–76 (in Ukrainian).
- Stepanyuk L.M., Paranko I.S., Ponomarenko O.M., Dovbush T.I., Vysotskyi O.B. 2011b. Uranium-lead age of clastogenic monazite from metasandstone of the Skelyuvatskaya suite of the Kryvyi Rih structure. *Mineralogical Journal*, 33, 4, 80–90 (in Ukrainian).
- Stepanyuk L.M., Shumlyansky L.V., Hoffmann A., Hormann M., Kovalick A. and Bekker A. 2020. On the Mesoarchean Age of Detrital Zircons From Meta-Terrigenous Rocks of the Skelyuvatka and Saksagan Suites of the Kryvyi Rih Structure, According to the Results of U-Pb Dating. *Mineralogical Journal*, 42, 2, 46–62. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.42.02.046> (in Ukrainian).
- Stepanyuk L.M., Vysotskyi O.B., Baran A.M., Kovtun O.V., Dovbush T.I., Kovalenko N.O. and Kotvitska I.M. 2024. Isotopic geochronology of granitoids of the Kirovograd complex, using the Lozuvat quarry as an example. *Geochem. and Ore Formation*, 45, 44–53. <https://doi.org/10.15407/gof.2024.45.045> (in Ukrainian).
- Stern R.A., Bodorkos S., Kamo S.L., Hickman A.H. and Corfu F. 2009. Measurement of SIMS Instrumental Mass Fractionation of Pb Isotopes During Zircon Dating. *Geostand. Geoanal. Res.*, 33, 145–168. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2009.00023.x>
- Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J.C. and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19, 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>
- Williams I.S. 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. *Review in Economic Geology*, 7, 1–35.
- Yesypchuk K.Yu., Bobrov O.B., Stepanyuk L.M., Shcherbak M.P., Glevassky Ye.B., Skobelev V.M., Drannik A.S. and Heichenko M.V. 2004. Correlation chronostratigraphic chart of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Explanatory note. Kyiv: UkrDGRI. (in Ukrainian).

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.343948>

УДК 552.5+551.7.022.4/734.5 (477.74)

## Літофізична будова відкладів середнього девону Переддобрудзького прогину в контексті тришарової моделі резервуарів

E-mail: kosagri@ukr.net,  
<http://orcid.org/0000-0003-1595-0968>;  
[vgnidets53@gmail.com](mailto:vgnidets53@gmail.com),  
<http://orcid.org/0009-0001-6372-7878>;  
[koshil\\_lesia@ukr.net](mailto:koshil_lesia@ukr.net),  
<http://orcid.org/0000-0001-6678-9460>;  
[myroslavakoshil@ukr.net](mailto:myroslavakoshil@ukr.net),  
<http://orcid.org/0000-0001-8967-0489>

Received / Надійшла до редакції:  
29.11.2025

Received in revised form /  
Надійшла у ревізованій формі:  
17.01.2026

Accepted / Прийнята:  
27.02.2026

\*Corresponding author /  
Автор для кореспонденції:  
V.P. Hnidets, [vgnidets53@gmail.com](mailto:vgnidets53@gmail.com)

**Keywords:** Dobrudja Foredeep, Middle Devonian, lithophysical structure.

**Ключові слова:** Переддобрудзький прогин, середній девон, літофізична структура.

К.Г. Григорчук, В.П. Гнідець\*, Л.Б. Кошіль, М.Б. Яковенко

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна

### Lithophysical structure of Middle Devonian deposits of the Dobrudja Foredeep in the context of the three-layer reservoir model

K.H. Hryhorchuk, V.P. Hnidets\*, L.B. Koshil, M.B. Yakovenko

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

In the work, for the first time, models of a three-layer lithophysical structure were developed for the Middle Devonian sediments of the Dobrudja Foredeep, which showed a rather complex picture of the spatial and age development of fluid-resistant packs and reservoir rocks, which is most clearly observed on the Skhidnosaratska structure, and is recorded by the lateral variability of the thicknesses of true fluid-resistant packs, reservoir horizons, as well as wedging or stratification of false fluid-resistant packs. In the area of the Yaroslavska, Saratskaya and Rozovskaya structures, the lithophysical structure of the stratum is more stable and homogeneous. For the Skhidnosaratska structure, arched hydrocarbon traps are outlined, which in most productive horizons are composed not only of reservoir rocks, but also of false fluid-resistant packs, which often form the main volume of the reservoir. In the area of the Yaroslavska structure, the presence of partially tectonically shielded traps (horizons e-1-e-3, g-2-g-4) is predicted, which are also of interest due to the increased thickness of the reservoir rock horizons and the relatively insignificant development of false fluid-resistant packs. Local or zonal natural reservoirs were discovered in the latter units, which include sulfate-carbonate reservoir rocks. This, as well as the heterogeneous mosaic structure of carbonate reservoir rocks and the specific properties of the "Saratskaya" oil, require special technological approaches when testing wells. Instead, the latter were carried out using traditional methods, which is one of the reasons for obtaining small and unstable hydrocarbon inflows. Failure to take into account the lithofacies and lithophysical features of the Middle Devonian deposits did not allow for the application of the optimal regime of reservoir opening and well development and, accordingly, obtaining significant oil inflows. In addition, the test intervals usually covered several productive horizons, probably with different energies, which could cause fluid interflow and negatively affect the results of oil field tests. The regional nature of the distribution of various signs of oil content probably records the migration paths of hydrocarbons at different stages of catagenesis. In this regard, it is planned to reconstruct the history of postdiagenesis in the future, including in the context of its influence on the formation of false fluid-resistant packs.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2026. 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 National Academy of Sciences of Ukraine, 2026. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Цитування: Григорчук К.Г., Гнідець В.П., Кошіль Л.Б., Яковенко М.Б. Літофізична будова відкладів середнього девону Переддобрудзького прогину в контексті тришарової моделі резервуарів. *Геологічний журнал*. 2026. № 1 (394). С. 48–58. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.343948>

Citation: Hryhorchuk K.H., Hnidets V.P., Koshil L.B., Yakovenko M.B. 2026. Lithophysical structure of Middle Devonian deposits of the Dobrudja Foredeep in the context of the three-layer reservoir model. *Geologichnij žurnal*, 1 (394), 48–58. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.343948>

## Вступ

**Постановка проблеми.** Багаторічні нафтогазопошукові роботи у Переддобрудзькому прогині не привели до виявлення істотних вуглеводневих скупчень. На даний час за наявності численних вуглеводневих проявів у сульфатно-карбонатній товщі середнього та верхнього девону встановлено лише Східносаратське та Жовтоярське нафтові родовища. При цьому характерною є подібність результатів випробування свердловин: незначні, швидко затухаючі припливи нафти. Це, а також неефективність застосування методів інтенсифікації припливів і фрагментарні результати петрографічних досліджень, а також специфіка нафти дали підстави дуже песимістично ставитися до можливих перспектив середньодевонського осадового комплексу, що дозволило зробити висновок про недоцільність подальших його наукових досліджень (Лазарук, Павлюк, 2023). Власне, це і стало підставою для повторного звернення до проблеми вивчення літогенетичних особливостей відкладів середнього девону в аспекті формування та поширення природних колекторів і флюїдотривів.

**Мета та завдання.** Дослідження спрямовані на уточнення літофізичної будови, з'ясування причин низької результативності нафтогеологічних досліджень та врешті-решт визначення ступеня нафтогазоперспективності відкладів середнього девону.

**Предмет та об'єкт роботи** – літофізична структура середньодевонських відкладів Східносаратської та сусідніх структур у контексті концепції тришарової будови резервуарів.

**Огляд попередніх досліджень.** Результати попередніх досліджень (Гнідець та ін., 2003, 2021) показали значно складнішу картину просторово-вікового розвитку у відкладах середнього девону колекторів і флюїдотривів, ніж традиційно вважалося. Зокрема, на відміну від існуючих поглядів (Атлас..., 1998) щодо наявності лише двох продуктивних горизонтів (ПГ), було виділено дев'ять таких утворень, які складені ангідрито-мергельними екрануючими пачками, що перекривають природні колектори переважно карбонатного складу. Були з'ясовані особливості поширення цих ПГ, основні риси локалізації резервуарів, характер розвитку порід-колекторів різного типу й якості. На цій основі спро-

гнозовано наявність пасток вуглеводнів (ВВ) і здійснено оцінку перспектив виділених ПГ. Результати моделювання історії катагенезу та нафтогазоутворення засвідчили високий потенціал в аспекті формування скупчень ВВ частини Тузлівської депресії, де розташована Східносаратська структура (Гнідець та ін., 2003).

Втім, деякі дослідники (Лазарук, Павлюк, 2023), ґрунтуючись на результатах випробувань свердловин, властивостей нафт і певних петрографічних даних, дійшли висновку про безперспективність хемогенно-карбонатної товщі середнього та верхнього девону Західного Причорномор'я. На наш погляд, цей висновок є передчасним. У даній роботі розглядаються можливі причини тих негативних показників (ознак), які призвели згаданих авторів до такого песимістичного заключення.

**Методологічні засади досліджень.** Згідно з метою роботи, увага передусім була зосереджена на локалізації неправдивих або хибних флюїдотривів (ХФ). Ця проблема у регіоні раніше не розглядалася. Натомість, за даними (Хитров, 2013), колектори в середньому складають лише 20–25 % товщини осадового чохла, ХФ – близько 60–65 % і тільки 10–15 % припадає на істинні флюїдотриви (ІФ).

З традиційної точки зору ХФ відіграють переважно негативну роль, оскільки зменшують корисний об'єм резервуарів. Однак роль ХФ у процесах генерації, міграції й акумуляції ВВ є значно складнішою та цим не вичерпується (Риле, 2013). На думку В.Д. Ілліна (Ільин, 1986), власне по породах ХФ відбувається основна міграція ВВ. ХФ можуть мати первинну седиментаційну природу, зокрема це притаманне поліциклічним карбонатно-хемогенним формаціям з послідовним чергуванням у розрізах рифогенних вапняків – сульфатно-карбонатних порід – ангідритів (Ільин, 1986). Власне, такі утворення у досліджуваному регіоні формують продуктивну товщу середнього девону, в якій виділено дев'ять циклітів (Гнідець та ін., 2003), середній елемент яких можна інтерпретувати як ХФ. Для визначення характеру поширення останніх були проведені більш детальні дослідження, ґрунтуючись на результатах вивчення літологічної структури розрізів ейфельських відкладів (Гнідець та ін., 2021) та додатково виконаних побудов по нашаруваннях живету.

## Результати та їхнє обговорення

### Загальна геологічна характеристика

Район досліджень, згідно із структурною схемою (Гнідець та ін., 2003), розміщений в межах Саратовсько-Балабанівської зони складок, котра простягається у північно-західному напрямку і розділяє Тузлівську та Нижньопрутську депресії (рис. 1). Були розглянуті відклади середнього девону Ярославського, Розівського, Саратовського та Східносаратовського підняття, деякі з яких ускладнені розривними порушеннями.

Нашарування ейфельського та живецького ярусів входять до складу герцинського структурно-літологічного комплексу та представлені сульфатно-карбонатними утвореннями циклічної будови, що спричинено ритмічною зміною умов седиментації. Потужність відкладів у Тузлівській депресії варіюється від 350 до 750 м, а в межах території досліджень – від 450 до 640 м.

### Поширення флюїдотривів, порід-колекторів і прогнозні пастки вуглеводнів

ХФ, згідно з даними робіт (Ильин, 1986; Лукін, 2011), відрізняються від ІФ і колекторських горизонтів проміжним характером літологічної будови. На основі таких особливостей нами здійснено літофізичну типізацію розрізів середнього девону. ІФ у досліджених відкладах представлені перешаруванням ангідритів (0,6–4,2 м), мергелів (0,5–2,8 м) і поодиноких прошарків (0,2–1 м) пелітоморфних карбонатних порід (рис. 2). Середній вміст (див. таблицю) ангідритів становить 52 %, мергелів – 43 %, карбонатних порід – 5 %. Останні представлені головню пелітоморфними вапняками та тонкозернистими доломітами.

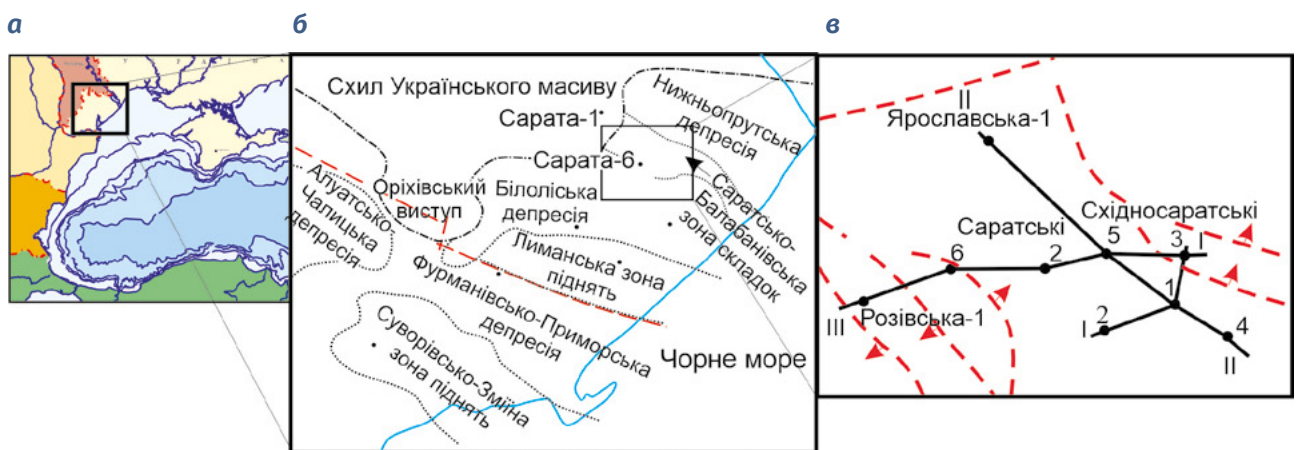
ХФ характеризуються чергуванням у розрізах вапняків, у тому числі доломітизованих та ангідритизованих, (1,2–5,6 м), мергелів (0,2–2,6 м), ангідритів (0,7–12 м), аргілітів (0,2–1,4 м), пісковиків та алевролітів (0,6–1,0 м), доломітів (0,1–0,8 м). Середній вміст вапняків і доломітів становить 48 %, мергелів – 31 %, ангідритів – 10 %, аргілітів – 5 %, пісковиків та алевролітів – 4 %. Карбонатні пачки потужністю 3–9 м, вочевидь, являють собою спорадичні локальні або зональні природні резервуари ВВ, що дає певні підстави позитивно оцінювати перспективність ХФ.

Колектори тріщинно-порового типу представлені пачками (1,5–14 м) органогенних, органогенно-уламкових вапняків різного ступеня доломітизації й ангідритизації, розмежованих прошарками мергелів товщиною до 1,2–1,4 м.

Колектори тріщинно-порового типу представлені пачками (1,5–14 м) органогенних, органогенно-уламкових вапняків різного ступеня доломітизації й ангідритизації, розмежованих прошарками мергелів товщиною до 1,2–1,4 м.

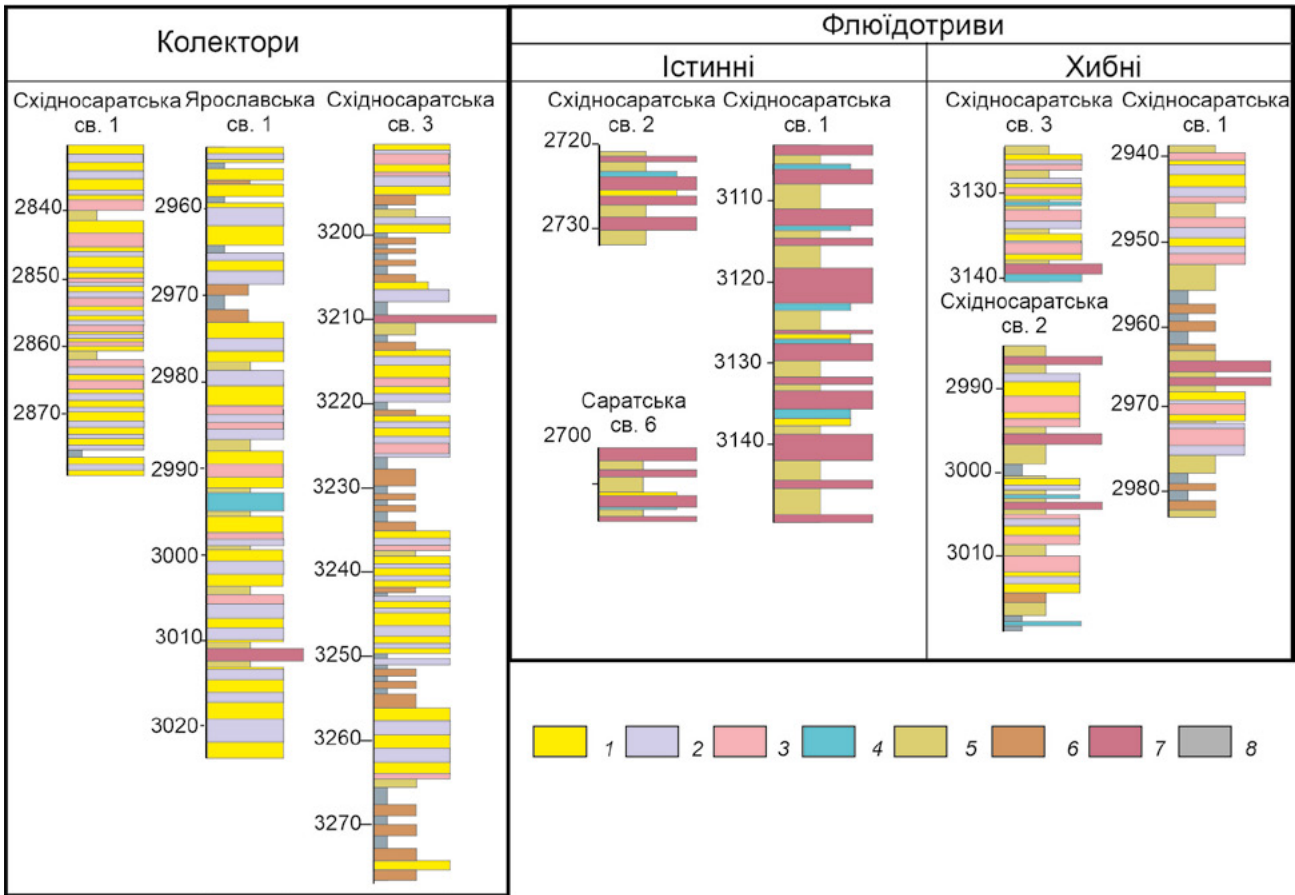
**Таблиця.** Середній склад основних літофізичних відмін  
**Table.** Average composition of the main lithophysical varieties

Літофізичні типи	Породи, %	Вапняки, доломіти	Мергелі	Ангідрити	Аргіліти	Пісковики, алевроліти
ІФ		5	43	52	0	0
ХФ		48	31	10	5	4
Природні колектори		75	5	2	10	8



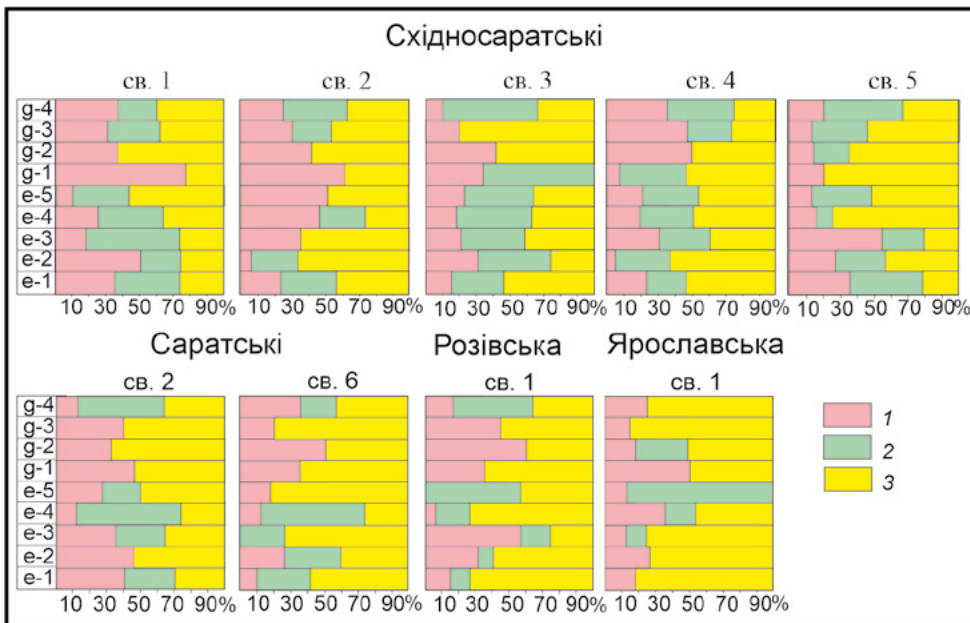
**Рис. 1.** Положення території досліджень (а), основні структурні елементи (б) (Гнідець та ін., 2003) та локалізація вивчених свердловин і перетинів (в)

**Fig. 1.** Location of the research area (a), main structural elements (б) (Hnidets et al., 2003), and localization of the studied wells and sections (в)



**Рис. 2.** Типові літологічні розрізи основних літофізичних відмін. 1 – вапняки, 2 – вапняки доломітизовані, 3 – вапняки ангідритизовані, 4 – доломіти, 5 – мергелі, 6 – пісковики, алевроліти, 7 – ангідрити, 8 – аргіліти

**Fig. 2.** Typical lithological sections of the main lithophysical varieties. 1 – limestones, 2 – dolomitized limestones, 3 – anhydritized limestones, 4 – dolomites, 5 – marls, 6 – sandstones, siltstones, 7 – anhydrites, 8 – mudstones

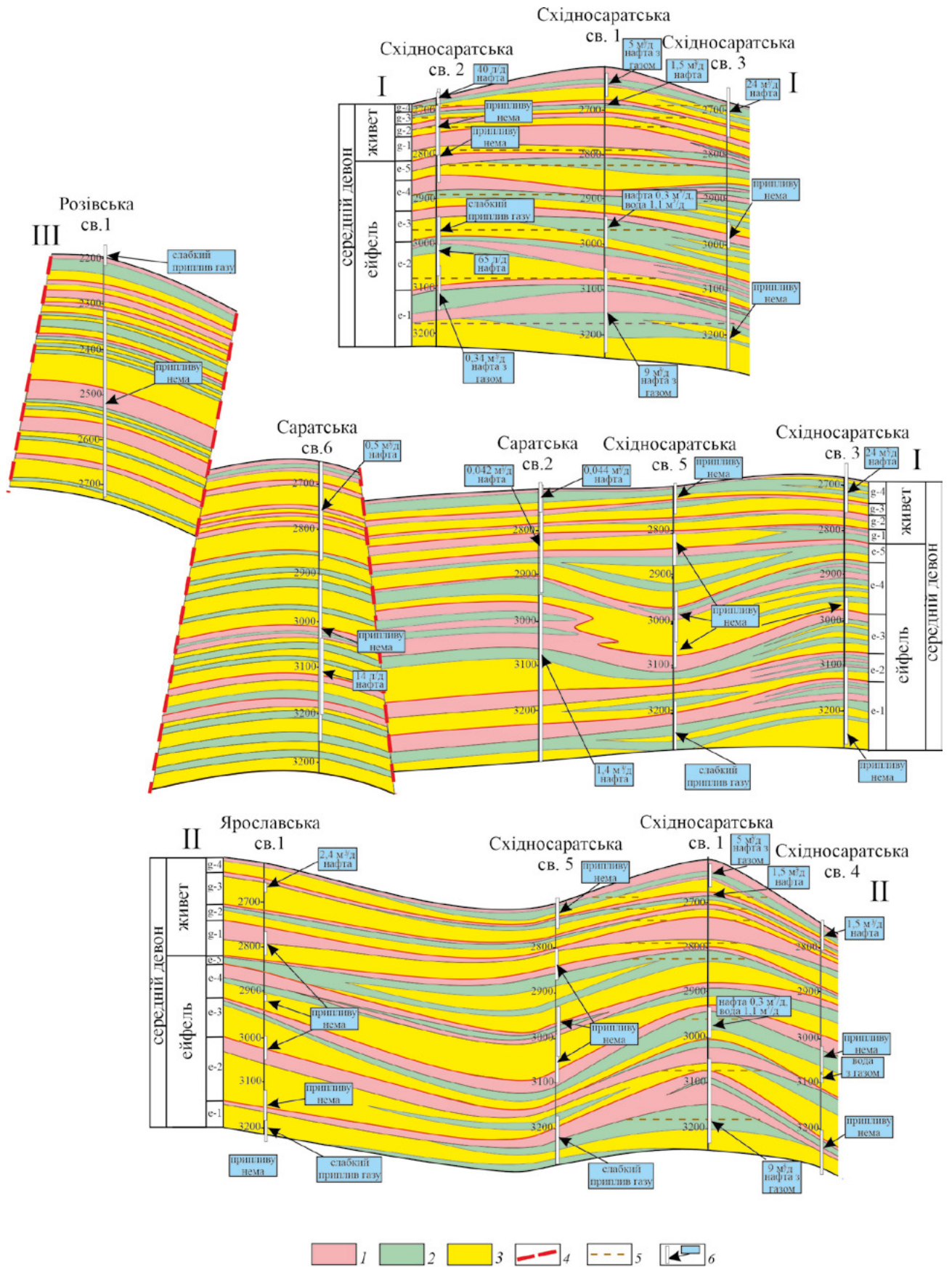


**Рис. 3.** Просторово-вікові особливості літофізичної будови ПГ. 1 – ІФ, 2 – ХФ, 3 – колектори

**Fig. 3.** Spatial-age features of the lithophysical structure of the PH. 1 – TC, 2 – FC, 3 – reservoir-rocks

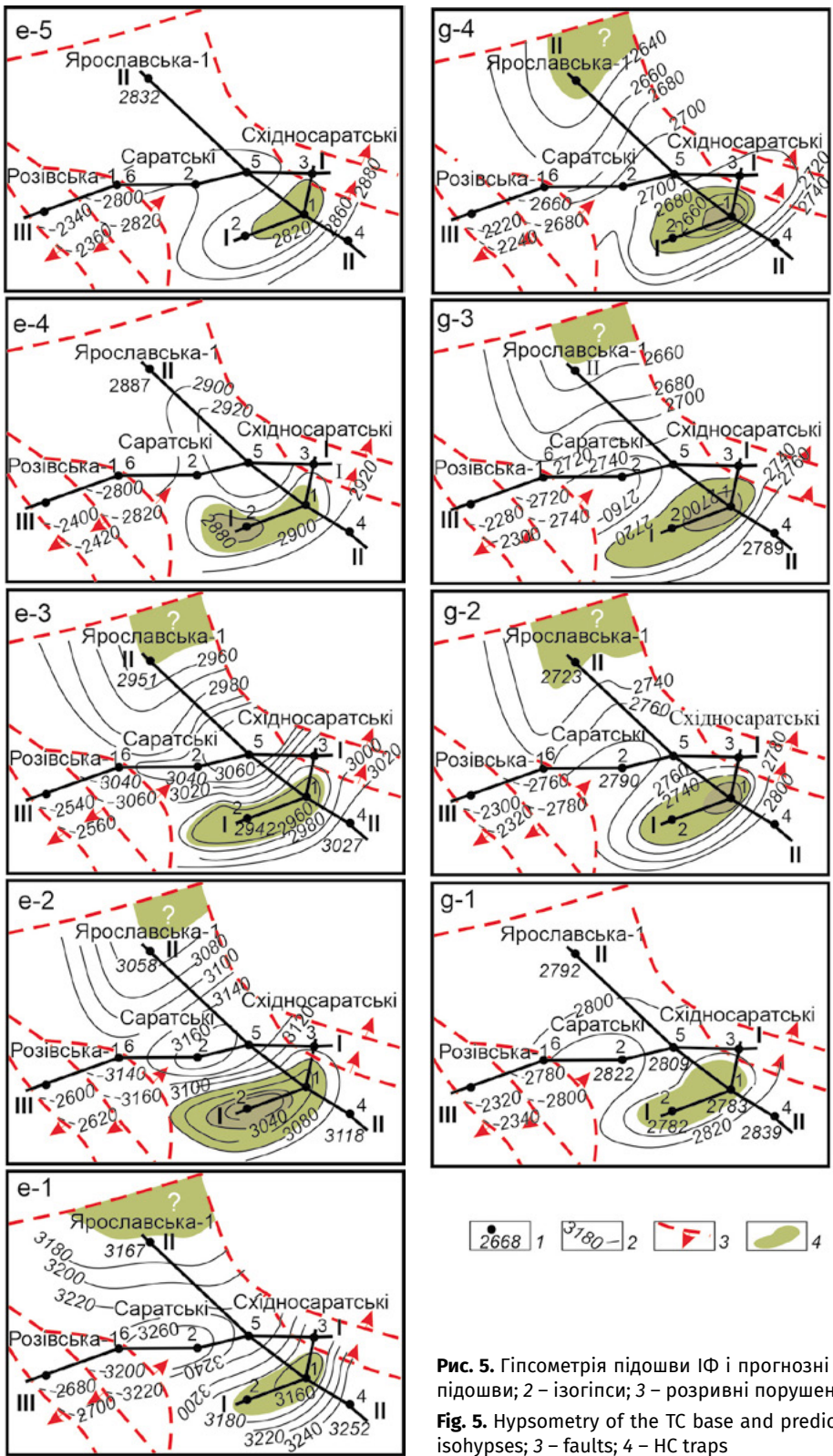
В окремих ПГ спостерігаються теригенні пакки (до 7–8 м), складені перешаруванням аргілітів, пісковиків та алевролітів (1,0–1,6 м). Такі утворення розглядаються як колектори тріщинного типу (Гнідець та ін., 2021).

На підставі аналізу отриманих даних для відкладів середнього девону створені моделі літофізичної структури та визначені просторово-вікові особливості її мінливості в межах дослідженої ділянки (рис. 3, 4).



**Рис. 4.** Моделі літофізичної будови та результати випробування свердловин. 1 – ІФ, 2 – ХФ, 3 – колектори, 4 – розривні порушення, 5 – прогнозний рівень водо-нафтового контакту, 6 – інтервал і результати випробувань

**Fig. 4.** Lithophysical structure models and well test results. 1 – TC, 2 – FC, 3 – reservoir-rocks, 4 – faults, 5 – predicted water-oil contact, 6 – interval and test results



**Рис. 5.** Гіпсометрія підовши ІФ і прогнозні пастки ВВ. 1 – свердловина, глибина підовши; 2 – ізогіпси; 3 – розривні порушення; 4 – пастки ВВ  
**Fig. 5.** Hypsometry of the TC base and predictive HC traps. 1 – well, base depth; 2 – isohypses; 3 – faults; 4 – HC traps

Крім того, побудовано схеми гіпсометрії підовши ІФ для кожного ПГ (рис. 5). Конфігурація ізогіпс ґрунтувалася на фактичних матеріалах для ділянки Східносаратської структури, а для районів структур Саратська та Розівська – даних роботи (Лазарук, Павлюк, 2023). В останньому випадку ізолінії мають прогнозний характер, що не дозволяє достовірно визначити локалізацію та мор-

фологію можливих пасток ВВ, хоча не виключає їхнього існування. Варто зазначити, що літологічна, а, відповідно, і літофізична будова середньодевонських відкладів цієї ділянки суттєво відрізняється від решти території (див. рис. 3), що, вочевидь, вказує на конседиментаційний характер розвитку блоків, обмежених розривними порушеннями. Подібне можна сказати і про

район св. Східносаратська-3, де розріз, на відміну від більшості свердловин, характеризується тонкошаруватою будовою. Ярославська ділянка також відрізняється певною літофізичною специфікою відкладів середнього девону (див. рис. 3, 4), що проявляється у меншому поширенні ХФ та більшій ролі природних колекторів.

Тришаровий варіант будови ПГ демонструє (див. рис. 4) доволі складну картину просторово-вікового розвитку флюїдотривів і порід-колекторів. Найвиразніше це спостерігається у відкладах ейфельського віку Східносаратської структури. Тут фіксуються суттєва мінливість товщини як ІФ, так і колекторських горизонтів, а також часте виклинювання або розшарування ХФ. У західних і північно-західних ділянках території досліджень літофізична будова товщі є більш витриманою й однорідною.

Здійснені побудови дозволяють по-новому розглянути морфологічні та структурно-речовинні особливості ймовірних пасток і вуглеводневих скупчень.

Насамперед розглянемо це питання на прикладі Східносаратського родовища. Локалізація пасток визначається гіпсометрією підшови ІФ. Так, у ПГ е-1 вимальовується склепінний резервуар, потенційно заповнений ВВ у районі св. 1 та 2 (див. рис. 4). На профілі І-І видно, що в апікальній частині (св. 1) він складений ХФ, тоді як у св. 2 він представлений породами-колекторами завтовшки 6–8 м. Пастка горизонту е-2 також охоплює обидві свердловини зі склепінням у ділянці св. 2, де розвинена потужна (понад 70 м) пачка природних колекторів, яка у напрямку до св. 1 редукується до 16 м. У ПГ е-3 спостерігається певною мірою подібна картина, за винятком того, що у св. 1 колекторський горизонт заміщується ХФ. Пастка горизонту е-4 є слабо вираженою: товщина ХФ перевищує її висоту, тому, незважаючи на наявність витриманого горизонту порід-колекторів (близько 20 м), акумуляція ВВ могла відбуватися лише у породах ХФ. Пастка ПГ е-5 є також малоамплітудною, зі склепінням, локалізованим у св. 1; резервуар складений переважно ХФ і лише поблизу св. 2 – частково породами-колекторами. Пастки живецького ярусу (ПГ g-1–g-4) також приурочені до району св. 1 і 2. У горизонті g-1 під потужним (30–50 м) ІФ можливе накопичення ВВ у колекторах завтовшки не більше 4–5 м. У горизонті g-2 товщина колекторів зростає до 20 м (св. 1), тоді як у горизонті g-3 – не перевищує 10 м через розвиток ХФ.

Найбільш об'ємним є резервуар горизонту g-4, де колектори можуть бути нафтонасиченими на всю товщину шару (приблизно 30 м).

У районі Ярославської структури за конфігурацією ізогіпс прогнозується наявність частково тектонічно екранованих пасток ВВ (ПГ е-1–е-3, g-2–g-4). Ця ділянка становить значний інтерес з огляду на велику товщину горизонтів порід-колекторів (до 60–90 м) і в той же час відносно слабкий розвиток ХФ (див. рис. 4, 5).

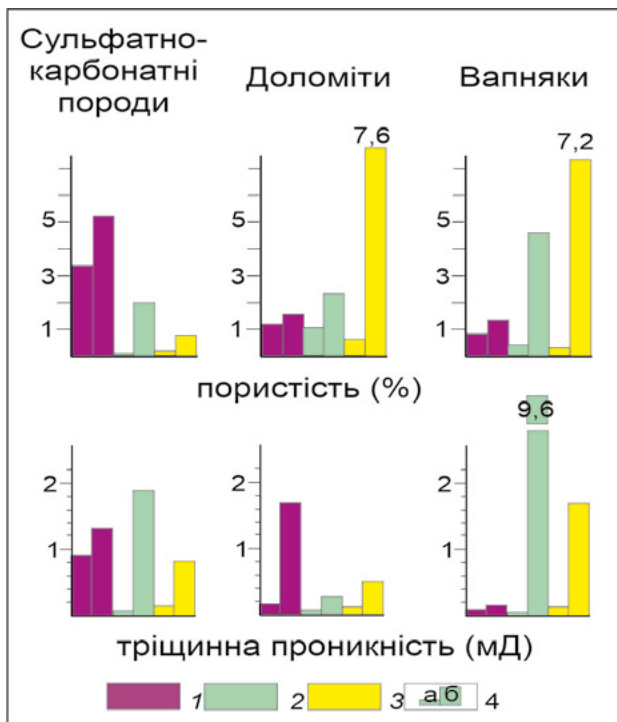
Перспективними є також відклади блоків свердловин Саратська-6 і Розівська-1, які характеризуються сприятливим для акумуляції ВВ співвідношенням колекторів, ХФ та ІФ. Обмежувальні розривні порушення, імовірно, періодично виконували роль провідників флюїдів, у тому числі вуглеводневих. Утім, через недостатність геологічної інформації на даному етапі спрогнозувати точну локалізацію пасток не видається можливим.

#### Деякі петрофізичні особливості відкладів

Породи середнього девону, за лабораторними даними (справи свердловин, понад 400 аналізів), загалом характеризуються низькими фільтраційно-ємнісними властивостями: пористість – до 1 %, проникність – менше ніж 0,01 мД. У пластових умовах ці показники, ймовірно, мають дещо вищі значення. Так, за результатами ГДС, значення пористості варіюються від 0–2 до 12 %. Крім того, варто враховувати, що найбільш пористі та проникні породи часто руйнуються при відборі керна, що ускладнює їх достовірну оцінку.

Оскільки ступінь вилучення ВВ з пластів передусім залежить від проникності, основну увагу було зосереджено на екстремальних значеннях цього параметра та проаналізовано особливості його варіацій (68 проб) у породах основних літофізичних відмін (рис. 6). Попри нерівномірне за ПГ представлення різних літотипів, простежуються певні тенденції.

По-перше, це наявність у ХФ порід з високими значеннями пористості та проникності, що може вказувати на вірогідність існування осередкових покладів у локальних (або зональних) резервуарах. Колекторами в останніх могли слугувати і сульфатно-карбонатні породи, які характеризуються досить високими фільтраційно-ємнісними властивостями. Через свої специфічні фізико-хімічні властивості вони, згідно з даними робіт (Плотников и др., 2000), могли зумовлювати нестабільність положення вуглеводневих скупчень (так званих «блукаючих» покладів).



**Рис. 6.** Екстремальні значення петрофізичних параметрів. 1 – ІФ, 2 – ХФ, 3 – колекторські пачки, 4 – мінімальне (а) та максимальне (б) значення

**Fig. 6.** Extreme values of petrophysical parameters. 1 – TC, 2 – FC, 3 – reservoir packets, 4 – minimum (a), and maximum (b) values

По-друге, значна мінливість петрофізичних параметрів у карбонатних колекторах засвідчує їх складну мозаїчну (кластерну) будову – так звану ажурну просторову конструкцію, за (Трохименко, 2013). Поєднання тріщинної сітки з поровою матрицею формує складну фільтраційну систему, що спричиняє нестабільний режим нафтовилучення. Крім того, згідно з даними праці (Трохименко, 2013), карбонатні резервуари нерідко не мають гідродинамічного зв'язку з природними водонапірними системами та характеризуються пониженою пластовою енергією. Такі особливості потребують застосування спеціалізованих технологічних підходів під час випробування свердловин і відпрацювання покладів.

### Результати випробування свердловин та інші ознаки нафтоносності

Зіставлення вуглеводневих проявів у розрізах з їх літофізичними особливостями дозволило певною мірою пояснити низьку ефективність результатів випробування свердловин.

Нижче більш детально зупинимося на Східносаратській структурі, де виявлено родовище нафти.

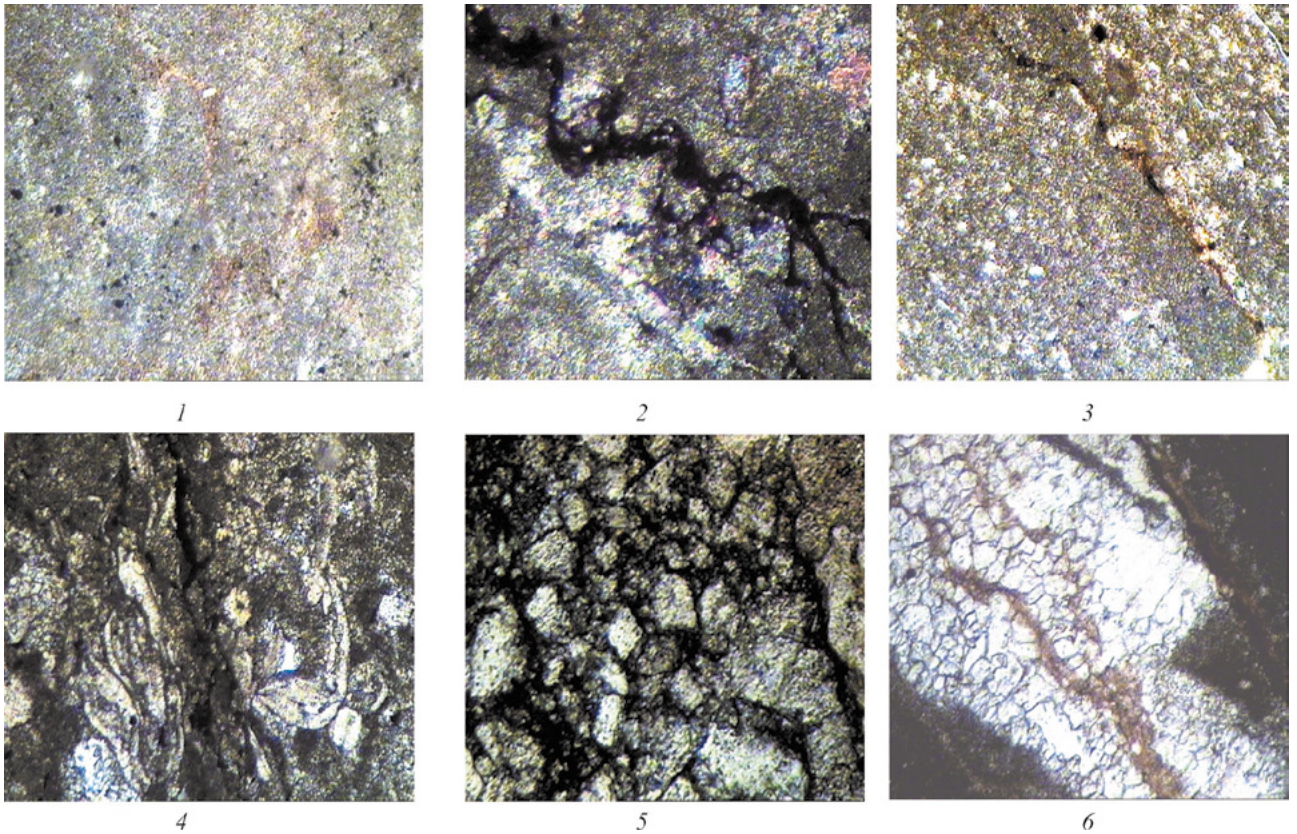
У св. Східносаратська-1 випробування фактично були проведені у трьох інтервалах розрізу (див. рис. 4). Нижній (понад 100 м) – охоплює відклади ПГ е-1 та частково ПГ е-2. У першому випадку, згідно з побудованою моделлю, нафтонасиченими могли бути лише породи ХФ, а у другому – пачка порід-колекторів. Ймовірно, основна частина ВВ (9 м<sup>3</sup>/добу) надходила саме з останніх. Середній інтервал (50 м) локалізований у ПГ е-3, де нафтонасиченість прогнозується у породах ХФ, що зумовило незначні припливи (0,3 м<sup>3</sup>/добу нафти та 1,1 м<sup>3</sup>/добу води). Вода, імовірно, надходила з нижчої пачки колекторських порід. З верхнього інтервалу (близько 60 м) з резервуара ПГ g-4 отримано приплив нафти з газом 5 м<sup>3</sup>/добу. Цей об'єкт виглядає найбільш оптимально – прогнозна товщина нафтонасиченого колектора становить близько 30 м. Щоправда, разом з останнім тестувався і ХФ, що могло певною мірою негативно вплинути на результат.

У св. Східносаратська-2 випробування здійснені у шести інтервалах (див. рис. 4), які здебільшого включали декілька ПГ. Ймовірно, саме це стало головною причиною отримання лише незначних припливів нафти. Продукція надходила з горизонтів, що, згідно з побудованою моделлю (див. рис. 4, 5), мають потенційну нафтогазоносність.

У св. Східносаратська-3, яка за більшістю ПГ знаходиться за межами контурів прогнозних покладів, припливів нафти не було, за винятком ПГ g-4 (24 м<sup>3</sup>/добу нафти). З цих же утворень отримано приплив нафти у св. Східносаратська-4. У решті досліджених свердловин інтервали випробувань також включали по декілька ПГ, що зумовило або відсутність припливів, або їх незначні дебїти (див. рис. 4).

Таким чином, недооцінка літофаціальних і літофізичних особливостей розрізу призвела до неефективного вибору режимів розкриття пластів та освоєння свердловин, що, своєю чергою, обмежило отримання промислових припливів.

У той же час у керні по всьому розрізу середнього девону як у межах, так і поза межами інтервалів випробування спостерігаються примазки нафти, а також бітуми у шліфах як по тріщинах, так і в основній масі порід (рис. 7). Виявлено декілька типів бітумів: рухомі (світло-жовті), малорухомі (бурі) та нерухомі (темно-бурі, чорні) (Гнідець та ін., 2003). У поєднанні з результатами моделювання історії катагенезу (Гнідець та ін., 2003) та даними роботи (Окрепкий, 2003) це



**Рис. 7.** Прояви бітумів у породах. 1 – вапняк пелітоморфний, насичений світло-жовтими бітумами, св. Саратська-3, гл. 2944–2953 м, зб. 60, нік. II; 2 – вапняк грудкуватий перекристалізований з чорними бітумами у стилоліті, св. Східносаратська-4, гл. 2732,8 м, зб. 60, нік. X; 3 – вапняк органогенно-етритовий з жовтими бітумами у прожилку й основній масі породи, св. Східносаратська-3, інт. 3070–3079 м, зб. 60, нік. II; 4 – вапняк остракодовий ангідритизований з прожилками темно-бурих бітумів, св. Східносаратська-3, гл. 2711,5 м, зб. 60, нік. II; 5 – доломіт крупнокристалічний із чорними бітумами, св. Східносаратська-1, гл. 2987–2992 м, зб. 60, нік. II; 6 – вапняк пелітоморфний із світло-бурими бітумами у прожилку кальциту, св. Саратська-3, інт. 3188–3191 м, зб. 90, нік. II

**Fig. 7.** Manifestations of bitumen in rocks. 1 – pelitomorphic limestone, saturated with light yellow bitumens, well Saratska-3, depth 2944–2953 m, inc. 60, nick. II; 2 – lumpy recrystallized limestone with black bitumens in stylolite, well Skhidnosaratska-4, depth 2732.8 m, inc. 60, nick. X; 3 – organogenic-detrital limestone with yellow bitumens in the vein and the main mass of the rock, well Skhidnosaratska-3, depth 3070–3079 m, inc. 60, nick. II; 4 – ostracod anhydritized limestone with veins of dark brown bitumens, well Skhidnosaratska-3, depth 2711.5 m, inc. 60, nick. II; 5 – coarse-crystalline dolomite with black bitumens, well Skhidnosaratska-1, depth 2987–2992 m, inc. 60, nick. II; 6 – pelitomorphic limestone with light brown bitumens in a calcite vein, well Saratska-3, int. 3188–3191 m, inc. 90, nick. II

свідчить про існування кількох етапів міграції вуглеводневих флюїдів. Регіональний характер різнорангових проявів ВВ, ймовірно, фіксує шляхи їх давньої міграції на різних етапах катагенезу, що потребує проведення детальної реконструкції динаміки останнього.

Випадки запечатування порожнин нерухомими бітумами (Лазарук, Павлюк, 2023), очевидно, пов'язані з впливом техногенних чинників. Варто зазначити, що за фізико-хімічними властивостями нафта середньодевонських відкладів, згідно з фізико-хімічними критеріями (Муслимов, 2005), належить до категорії важковидобувних. Існуючі методи її видобування, ймовірно, не лише не сприяли покращенню результатів, а подекуди погіршували ситуацію. Зокрема, закачування холодної води в пласт, а також солянокислотні обробки спричинили погіршення властивостей

нафти – підвищення в'язкості, зростання вмісту смол, збільшення щільності та вмісту сірки.

Як зазначається у роботі (Муслимов, 2005), на об'єктах із важковидобувними запасами методи підвищення нафтовіддачі та стимуляції свердловин необхідно застосовувати з початкових етапів розробки, інакше у більшості випадків не вдасться сформувати ефективну систему експлуатації.

## Висновки

Моделі літофізичної структури відкладів середнього девону показали доволі складну картину просторово-вікового розвитку флюїдотривів і порід-колекторів. Це найвиразніше спостерігається на Східносаратській структурі та фіксується латеральною мінливістю товщин як ІФ, так і колекторських горизонтів, а також

виклинюванням або розшаруванням ХФ. У західних і північно-західних ділянках території досліджень літофізична будова товщі є більш витриманою й однорідною.

Для Східносаратської структури оконтурені склепінні пастки ВВ. Встановлено, що за більшістю ПГ вони складені не тільки породами-колекторами, але і ХФ, які у ряді випадків займають основний об'єм резервуара. У межах Ярославської структури прогнозується наявність частково тектонічно екранованих пасток ВВ (ПГ е-1-е-3, г-2-г-4). Ця ділянка становить інтерес і з огляду на збільшену товщину горизонтів порід-колекторів (до 60–90 м) і в той же час порівняно незначний розвиток ХФ.

Складна (мозаїчна) будова карбонатних колекторів, виявлення у ХФ локальних або зональних природних резервуарів, до складу яких входять також сульфатно-карбонатні колектори, а також характерні властивості «саратської» нафти, – все це вимагає спеціальних технологічних підходів при випробуванні

свердловин. Натомість останні здійснювалися традиційними методами, що є однією з причин отримання невеликих і нестабільних припливів ВВ.

Таким чином, неврахування літофаціальних (літофізичних) особливостей відкладів середнього девону не дозволило застосувати оптимальний режим розкриття пластів та освоєння свердловин і, відповідно, отримати промислово значущі припливи нафти. Крім того, інтервали випробувань зазвичай охоплювали декілька ПГ, вірогідно, з різною пластовою енергією, що могло спричинити взаємоперетікання флюїдів і негативно впливати на результати нафтопромислових випробувань.

Регіональне поширення різноманітних ознак нафтогазоносності, ймовірно, фіксує шляхи міграції ВВ на різних етапах катагенезу. Це потребує реконструкції динаміки останнього, що є важливим і для з'ясування характеру ХФ, оскільки в їх формуванні, на думку О. Ю. Лукіна (Лукин, 2011), відіграють певну роль і післяседиментаційні чинники.

У роботі вперше для відкладів середнього девону Переддобрудзького прогину розроблено моделі тришарової літофізичної структури, які показали доволі складну картину просторово-вікового розвитку флюїдотривів і порід-колекторів. Це найвиразніше спостерігається на Східносаратській структурі та фіксується латеральною мінливістю товщин істинних флюїдотривів, колекторських горизонтів, а також виклинюванням або розшаруванням хибних флюїдотривів. У межах структур Ярославська, Саратська та Розівська літофізична будова товщі є більш витриманою й однорідною. Для Східносаратської структури оконтурені склепінні пастки вуглеводнів, які за більшістю продуктивних горизонтів складені не тільки породами-колекторами, але і хибними флюїдотривами, що часто формують основний об'єм резервуара. У ділянці Ярославської структури прогнозується наявність частково тектонічно екранованих пасток (продуктивні горизонти е-1-е-3, г-2-г-4), які становлять інтерес і з огляду на збільшену товщину горизонтів порід-колекторів і порівняно незначний розвиток хибних флюїдотривів. У пачках останніх виявлено локальні або зональні природні резервуари, до складу яких входять сульфатно-карбонатні колектори. Це, а також неоднорідна мозаїчна будова карбонатних колекторів та специфічні властивості «саратської» нафти вимагає спеціальних технологічних підходів при випробуванні свердловин. Натомість останні здійснювалися традиційними методами, що є однією з причин отримання невеликих і нестабільних припливів вуглеводнів. Неврахування літофаціальних і літофізичних особливостей відкладів середнього девону не дозволило застосувати оптимальний режим розкриття пластів та освоєння свердловин і, відповідно, отримати значущі припливи нафти. Крім того, інтервали випробувань зазвичай охоплювали декілька продуктивних горизонтів, ймовірно, з різною пластовою енергією, що могло спричинити взаємоперетікання флюїдів і негативно вплинути на результати нафтопромислових випробувань. Регіональний характер поширення різноманітних ознак нафтогазоносності, ймовірно, фіксує шляхи міграції вуглеводнів на різних етапах катагенезу. У зв'язку з цим у подальшому планується реконструювати історію постдіагенезу, у тому числі і в контексті його впливу на формування хибних флюїдотривів.

## Список літератури

- Атлас родовищ нафти і газу України. Т. 6. Південний нафтогазоносний регіон: Іванюта М.М. (гол. ред.). Львів: УНГА, 1998. 224 с.
- Гнідець В.П., Григорчук К.Г., Павлюк М.І., Кошіль Л.Б., Яковенко М.Б. Літогенетичні передумови формування резервуарів і порід-колекторів у середньодевонських відкладах Східносаратського родовища (Переддобрудзький прогин). *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2021. № 3 (80). С. 7–18. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2021-3\(80\)-7-18](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2021-3(80)-7-18)
- Гнідець В.П., Григорчук К.Г., Полухтович Б.М., Федішин В.О. Літогенез девонських відкладів Придобрудзького прогину (палеоокеанографія, седиментаційна циклічність, формування порід-колекторів). Київ: УкрДГРІ, 2003. 94 с.
- Ильин В.Д. Прогноз нефтегазоносности локальных объектов на основе выявления ловушек в трехчленном резервуаре: методические указания. Москва: ВНИГНИ, 1986. 67 с.
- Лазарук Я., Павлюк М. Напрямки оптимізації розвідки і розроблення нафтових родовищ Західного Причорномор'я України. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2023. № 3–4 (191–192). С. 7–19. <https://doi.org/10.15407/ggcm2023.191-192.007>
- Лукин А.Е. Ложные покрышки нефтяных и газовых залежей – потенциальный источник природного газа. *Геол. журн*. 2011. № 4 (337). С. 7–16.
- Муслимов Р.Х. Нетрадиционные залежи нефти – существенный потенциал дальнейшего развития старых нефтедобывающих районов. *Георесурсы*. 2005. № 1 (16). С. 2–8.
- Окрелкий Р.М. Геологічні умови формування важких високов'язких нафт і перспективи пошуків їх покладів у нафтогазоносних регіонах України: дис. ... канд. геол. наук. Івано-Франківськ, 2003.
- Плотников Н.А., Плотникова И.Н., Изотов В.Г. Перспективы установления блуждающих залежей углеводородов в верхнедевонской сульфатно-карбонатной формации на периферии Татарского свода. *Материалы конф. «Новые идеи поиска и разработки нефтяных месторождений»*. Казань, 2000. Т. 1. С. 197–199.

Риле Е.Б. Аккумуляция углеводородов в трехслойных природных резервуарах. *Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г.* Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. № 5 (16). С. 41–46.

Трохименко Г.Л. Особливості природних резервуарів вуглеводнів у потужних карбонатних комплексах. *Геологія і пошук. Іскопаєміе Мирового океана.* 2013. № 4. С. 46–62.

Хитров А.М. Покрышки залежей углеводородов и ресурсный потенциал недр. *Актуальные проблемы нефти и газа.* 2013. № 1. С. 7–10.

## References

Atlas of oil and gas fields of Ukraine: in 6 vols. Vol. 6: Southern oil and gas-bearing region. (Editor-in-Chief M.M. Ivanyuta). 1998. Lviv: UNGA. 224 p. (in Ukrainian).

Hnidets V.P., Hryhorchuk K.H., Pavlyuk M.I., Koshil L.B., Yakovenko M.B. 2021. Lithogenetic preconditions of reservoirs and reservoir rocks formation in the Middle Devonian sediments of the Skhidnosaratske deposit (Dobrudja Foredeep). *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 3 (80), 7–18. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2021-3\(80\)-7-18](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2021-3(80)-7-18) (in Ukrainian).

Hnidets V.P., Hryhorchuk K.H., Polukhtovych B.M., Fedyshyn V.O. 2003. Lithogenesis of the Devonian deposits of the Dobrudja Foredeep (paleoceanography, sedimentation cyclicality, formation of reservoir rocks). Kyiv: Ukrainian State Geological Research Institute (in Ukrainian).

Ilyin V.D. 1986. Forecast of oil and gas potential of local objects based on the detection of traps in a three-membered reservoir: methodological instructions. Moscow: VNIGNI (in Russian).

Khitrov A.M. 2013. Hydrocarbon deposits caps and resource potential of subsoil. *Actual problems of oil the gas*, 1, 7–10 (in Russian).

Lazaruk Ya., Pavlyuk M. 2023. Directions of optimization of exploration and development of oil fields of the Western Black Sea region of Ukraine. *Geology and geochemistry of combustible minerals*, 3–4 (191–192), 7–19. <https://doi.org/10.15407/ggcm2023.191-192.007> (in Ukrainian).

Lukin A.E. 2011. False covers of oil and gas deposits – a potential source of natural gas. *Geologičnij žurnal*, 4 (337), 7–16 (in Russian).

Muslimov R.H. 2005. Unconventional oil deposits – significant potential for further development of old oil-producing areas. *Georesursy*, 1 (16), 2–8 (in Russian).

Okrepky R.M. 2003. Geological conditions for the formation of heavy high-viscosity oils and prospects for searching for their deposits in oil and gas-bearing regions of Ukraine: diss. ... Candidate of Geological Sciences. Ivano-Frankivsk (in Ukrainian).

Plotnikov N.A., Plotnikova I.N., Izotov V.G. 2000. Prospects for establishing wandering hydrocarbon deposits in the Upper Devonian sulfate-carbonate formation on the periphery of the Tatar arch. *Materials of Conference "New ideas for prospecting and developing oil fields"*. Kazan. 1, 197–199 (in Russian).

Rile E.B. 2013. Accumulation of hydrocarbons in three-layer natural reservoirs. *Vesti gasovy nauki: Problems of resource provision of gas-producing regions of Russia until 2030.* Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 5 (16), 41–46 (in Russian).

Trokhimenko G.L. 2013. Peculiarities of natural hydrocarbon reservoirs in powerful carbonate complexes. *Geology and Minerals of the World Ocean*, 4, 46–62 (in Ukrainian).

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.349750>

UDC 553.982:556.3:550.4:477.8

## Hydrogeochemical Settings of the Boryslav–Pokuttia Oil and Gas Bearing Area within the Carpathian Oil and Gas Bearing Province, Ukraine

E-mail: v\_harasymchuk@ukr.net,  
<https://orcid.org/0000-0002-4377-2655>;  
halmedvid@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-5059-245X>;  
olga\_teleгуz@ukr.net,  
<https://orcid.org/0000-0001-5761-7528>

Received / Надійшла до редакції:  
15.12.2025

Received in revised form /  
Надійшла у ревізованій формі:  
06.02.2026

Accepted / Прийнята:  
20.03.2026

\*Corresponding author /  
Автор для кореспонденції:  
V.Yu. Harasymchuk, v\_harasymchuk@ukr.net

**Keywords:** oil and gas bearing  
area, aquifer, hydrogeochemical  
characteristics, groundwater.

**Ключові слова:** нафтогазоносна зона,  
водоносний горизонт, гідрогеохімічні  
характеристики, підземні води.

V.Yu. Harasymchuk\*, H.B. Medvid, O.V. Teleгуz

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

Гідрогеохімічні умови Бориславсько-Покутського нафтогазоносного району  
в межах Карпатської нафтогазоносної провінції, Україна

В.Ю. Гарасимчук\*, Г.Б. Медвідь, О.В. Телегуз

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна

The objective of this study was to investigate the hydrogeochemical characteristics of aquifers within the Boryslav-Pokuttia oil and gas-bearing area, to examine the genesis of groundwater and its influence on the conditions of formation and preservation of hydrocarbon accumulations, and to identify hydrogeochemical criteria of hydrocarbon potential. The research methodology relied on the statistical and graphical processing of verified archival data and the subsequent interpretation of the results obtained. Paleohydrogeological analysis was also applied.

It was established that the principal factors controlling the hydrogeochemical parameters of aquifers in the area include the palaeohydrogeological evolution and the degree of hydrogeological isolation. Prolonged and intensive dynamo-elisional development, the fold-and-thrust structural pattern, numerous disjunctive faults, and the presence of evaporite deposits have resulted in the formation of a complex hydrogeochemical system lacking distinct zonation.

Genetically, most waters represent sedimentogenic residual brines of evaporitic basins or brines resulting from the leaching of salt-bearing molasse deposits, as well as their mixtures. At shallow depths, mineralised and saline waters enriched in bicarbonate and sulphate ions are occasionally encountered. Based on geochemical indicators, these waters are identified as mixtures of ancient or modern infiltration waters with sedimentogenic thalassogenic waters.

Indirect hydrogeochemical criteria for hydrocarbon potential in the Boryslav-Pokuttia area include: high Total Dissolved Solids (TDS) and waters metamorphization, their Na-Cl or Ca-Na-Cl composition, enrichment in trace elements and microcomponents, and low sulphate concentrations. Collectively, these features indicate a closed hydrodynamic system favourable for the formation and preservation of hydrocarbon accumulations.

© Видавець Інститут геологічних наук  
НАН України, 2026. 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 National Academy of Sciences of  
Ukraine, 2026. This is an Open Access article  
under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Citation: Harasymchuk V.Yu., Medvid H.B., Teleгуz O.V. 2026. Hydrogeochemical Settings of the Boryslav–Pokuttia Oil and Gas Bearing Area within the Carpathian Oil and Gas Bearing Province, Ukraine. *Geologіchnij žurnal*, 1 (394), 59–72. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.349750>

Цитування: Гарасимчук В.Ю., Медвідь Г.Б., Телегуз О.В. Гідрогеохімічні умови Бориславсько-Покутського нафтогазоносного району в межах Карпатської нафтогазоносної провінції, Україна. *Геологічний журнал*. 2026. № 1 (394). С. 59–72. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.349750>

## 1. Introduction

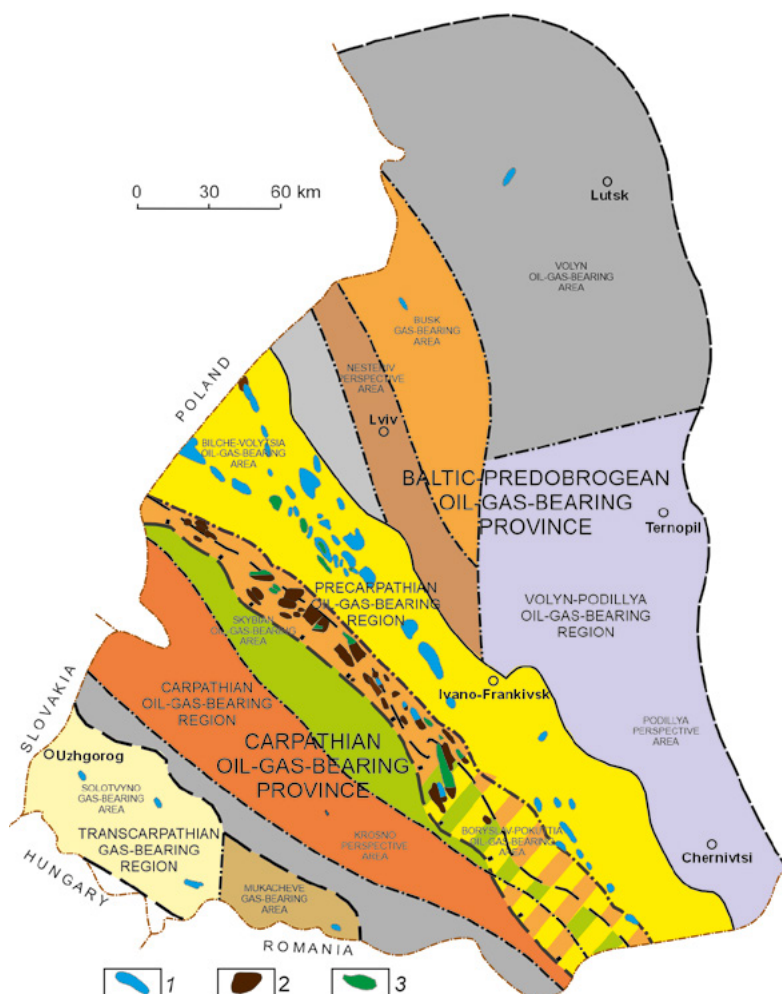
The study of hydrogeochemical settings in oil and gas bearing regions is one of the areas of contemporary petroleum geology, as the chemical composition of groundwater directly reflects geological evolution, fluid-regime dynamics, and the conditions under which hydrocarbon reservoir form. Formation waters constitute sensitive indicators of migration processes, fluid systems type and evolutionary stage, as well as water-rock interaction. Hydrogeochemical parameters are widely used to determine water genesis, assess hydrocarbon potential, delineate prospective zones, evaluate trap isolation, and reconstruct hydrocarbon migration pathways.

The relevance of such studies is reinforced by the current demands of the petroleum industry, which require reliable methods for evaluating geological settings and improving field development efficiency. Hydrogeochemical analysis supports the assessment of hydrodynamic conditions, identification of anomalous zones, and prediction of fluid behaviour during drilling and reservoir exploring.

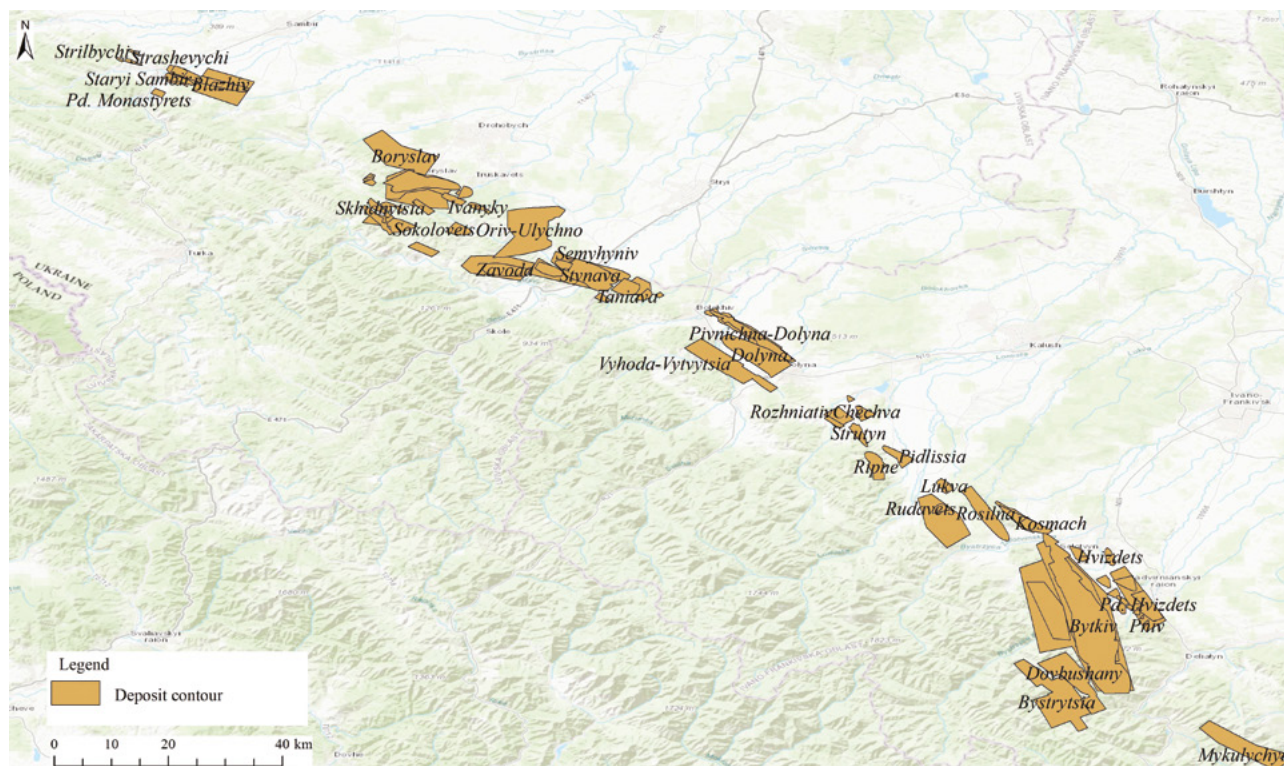
Beyond their applied significance, hydrogeochemical investigations are also fundamental to reconstructing the geological evolution of petroleum basins. The chemical and isotopic characteristics of groundwater enable reconstruction of water system genesis, the stages and mechanisms of their transformation, the link between tectonic and sedimentary processes, and the conditions of hydrocarbon generation and preservation.

Collectively, these factors highlight the need of a systematic and integrated approach to studying hydrogeochemical settings in oil and gas bearing areas, which is essential for advancing exploration methods, improving resource assessment, and ensuring the rational development of oil and gas fields.

The objective of this study was to determine the conditions for the formation and preservation of hydrocarbon accumulations and to identify specific hydrogeochemical criteria of oil and gas potential in the Boryslav–Pokuttia oil and gas bearing area (OGBA), based on the analysis of the geochemical characteristics of groundwater.



**Fig. 1.** Scheme of oil and gas geological zoning of the western region of Ukraine (Ivaniuta, 1998): 1 – gas fields; 2 – oil fields; 3 – gas-condensate fields



**Fig. 2.** Locations of hydrocarbon fields in the Boryslav-Pokuttia oil and gas-bearing area

According to the oil and gas geological zoning of Ukraine (Ivaniuta, 1998), the Boryslav-Pokuttia OGBA forms a part of the Precarpathian oil and gas bearing region within the Carpathian oil and gas province (Fig. 1). The region is predominantly oil-bearing. Within its boundaries a total of 37 oil fields, 7 oil-gas-condensate fields, 2 gas-oil fields, and 2 gas-condensate fields have been discovered (Fig. 2).

The Boryslav-Pokuttia OGBA is one of the oldest petroleum-producing regions in Europe and the most thoroughly explored one within Ukraine. It is associated with the Boryslav-Pokuttia Nappe of the Precarpathian Foredeep and encompasses the southwestern part of Lviv Region and the northwestern part of Ivano-Frankivsk Region. The area exhibits a complex system of linear folded and thrust structures. The productive strata include Oligocene and Miocene formations represented by sandstones, siltstones, and argillites, which form fractured-porous and fractured reservoirs. The main accumulations are associated with anticlinal and disrupted structures, often of the multi-storey and block-type.

Oil and gas accumulations occur at depths of 800–2500 m, increasing to 3000–3500 m in sub-thrust zones. Oils are predominantly light to medium, low-sulphur, and enriched in light fractions. Formation waters exhibit Na-Cl and Ca-Na-Cl composition with high TDS (40–120 g/dm<sup>3</sup>) and elevated gas content.

Although substantially depleted by long-term development, the region retains exploration potential within deeper productive horizons and local structures in sub-thrust zones.

The research was conducted within the framework of the state-funded scientific project “Hydrogeological Conditions of Hydrocarbon Accumulation in the Boryslav-Pokuttia Oil and Gas Bearing Area and the Impact of Petroleum Extraction on Surface and Groundwater Systems” at the Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the National Academy of Sciences of Ukraine.

## 2. Materials and Methods

The research methodology involved statistical and graphical processing of archival data, followed by their validation, and interpretation of the results obtained. Empirical physical and chemical groundwater data (macro- and microcomponents) from the Boryslav-Pokuttia OGBA were sourced from well records (“Well Reports”) archived at the State Geological Enterprise “Zakhidukrgeologia” of the National Joint Stock Company “Nadra Ukrainy”. Water sampling was conducted during drilling and testing of exploratory and production wells at oil and gas fields during the 1960s–2000s. In the same years, analytical studies of formation water

**Table 1.** Changes in the chemical composition of seawater during evaporation (based on data adapted from (Carpenter, 1978; Holland, 1978) with the authors' additions)

Evaporation stage	TDS, g/L	Concentrations, mg/L							rNa/ rCl	rCa/ rMg	rSO <sub>4</sub> <sup>-</sup> / 100/ rCl	Cl/Br
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>				
Black Sea water	18.76	233	679	5,820	193	1,460	10,340	35	0.86	0.21	10.30	295.43
World Ocean water	35.97	420	1,330	11,060	410	2,790	19,890	69	0.85	0.19	10.23	288.26
Onset of gypsum precipitation	143.63	1,700	5,200	44,000	1,460	11,000	80,000	269	0.84	0.20	10.03	297.40
Visible gypsum	192.05	1,040	7,590	59,700	2,220	13,300	107,800	396	0.84	0.08	9.00	272.22
Onset of halite precipitation	311.72	600	10,200	99,000	3,300	18,000	180,000	617	0.84	0.04	7.29	291.73
Visible halite	331.82	307	19,600	94,300	5,600	27,700	183,300	1,010	0.78	0.01	11.02	181.49
Halite	388.27		50,500	55,200	15,800	76,200	187,900	2,670	0.45	0.00	29.57	70.37
Onset of MgSO <sub>4</sub> precipitation	397.67		56,100	48,200	17,700	82,200	190,500	2,970	0.39	0.00	31.46	64.14
Onset of potassium salt precipitation	405.77		72,900	22,100	25,900	56,100	224,000	4,770	0.15	0.00	18.26	46.96
Potassium salts	434.62		92,600	8,960	18,800	54,200	254,000	6,060	0.05	0.00	15.56	41.91

samples were conducted in the laboratories of "Zakhidukrgeologia" using titrimetric, spectrophotometric and gravimetric methods.

To ensure the reliability of the dataset, analytical results were systematically verified, and unreliable records were excluded. The exclusion criteria were as follows:

- Where multiple samples had been collected from the same interval over a short period, only the sample with the highest mineralisation was retained, as the remaining samples likely reflected mixing of formation water with technical fluids (e.g. drilling muds and flushing waters).
- Samples representing injected waters used to maintain reservoir pressure during the late stages of field development were excluded.
- Samples exhibiting clear geochemical evidence of mixing with technical waters (as indicated by rNa/rCl, rCa/rMg, Cl/Br ratios) were removed.
- Samples containing evidently erroneous analytical values or recording errors were eliminated.

Following this filtering procedure, a total of 592 groundwater analyses were retained for further evaluation.

Statistical processing of groundwater geochemical parameters included correlation analysis (Pearson's correlation coefficient, presented as a correlation matrix), data distribution analysis, and descriptive statistics were applied. The software employed were

Microsoft Excel and TIBCO Statistica. Graphical output was generated in CorelDRAW and ArcMap. Palaeohydrogeological analysis integrated palaeotectonic, palaeosedimentological, palaeohydrogeochemical, and palaeohydrodynamic investigations.

For the palaeohydrogeological analysis, data on the composition of seawater during evaporation (Table 1) were incorporated.

### 3. Review of Previous Studies

One of the earliest researchers of Carpathian groundwater was the renowned Austrian scholar and professor at Lviv University, Balthasar Hacquet (1739–1815), who initiated systematic investigations into groundwater chemistry associated with petroleum accumulations (Krushelnytska, Valo, 2000).

In the 19th century, groundwater Steller and Zakrzewskyi furthered these studies. Lviv scholar Torosiewych, while examining hydrogen-sulphide mineral springs, suggested that hydrogen sulphide originates from organic matter decomposition (Krushelnytska, Valo, 2000).

Significant data on saline formation waters of the Precarpathian petroleum province, particularly those in the Boryslav oil field, were published by Zuber, Tolwinskyi and Katz. Tolwinskyi concluded that the waters of the Boryslav field are hydrodynamically connected to deeper aquifers (Tolwinskyi, 1921).

K. S. Havrylenko and O. D. Shtohryn emphasized the role of endogenous factors in the formation of groundwater in the oil and gas bearing regions of the Precarpathian area (Shtohryn, Havrylenko, 1968; Havrylenko et al., 1971). Hydrogeochemical and hydrodynamic features, as well as criteria for hydrocarbon potential in the Carpathian province, are presented in the works of (Shchepak, 1971; Romaniuk et al., 1973; Sprynskyi, 1998; Kolodiy et al., 1996; Kolodiy, 2004; Pavlyuk et al., 2021) among others.

Issues of groundwater genesis and chemical evolution in sedimentary and petroleum basins worldwide are extensively discussed in the literature (Carpenter, 1978; Xinong et al., 2006; Birkle et al., 2009; Dresel, Rose, 2010; Cortes et al., 2016; Cai et al., 2022; Luan et al., 2022;).

## 4. Results and Discussion

### 4.1 Geochemical Characteristic and Genesis of Groundwater

Aquifers within the Boryslav-Pokuttia OGBA occur in the Upper Cretaceous ( $K_{2st}$ ) Stryi Formation, the Paleocene ( $P_{1jm}$ ) Yamna Formation, Eocene units ( $P_2$ ), the Oligocene Menilite Formation ( $P_{3ml}$ ), and the Miocene Polyanytsia ( $N_{1pl}$ ) and Vorotyshcha

( $N_{1vr}$ ) formations. Due to intense folding, fragmentation, and block-thrust tectonics, these aquifers occur at highly variable depths.

According to their main geochemical features (Table 2), water characteristics across all aquifers are similar: they are predominantly highly mineralised brines of Na-Cl or Ca-Na-Cl composition. Waters with lower TDS (<30 g/L) contain higher concentrations of bicarbonate and sulphate ions and lower amounts of trace elements.

Groundwater genesis in the region was evaluated using palaeohydrogeological analysis supported by statistical methods.

The lithological (flysch-type clayey rocks) and palaeontological (Inoceramid debris) features of the Stryi Formation indicate shallow-marine depositional conditions with the normal marine water circulation.

Paleogene sedimentation occurred in shallow to moderately deep open-marine settings under warm subtropical climate conditions (Temniuk et al., 1973), as evidenced by molluscan and nummulite faunas.

The greenish coloration and the presence of gypsum in the flysch-like deposits of the Polyanytsia Formation suggest shallow-water conditions of a restricted marine basin, with the inflow of highly

**Table 2.** Principal geochemical characteristics of the aquifers of the Boryslav-Pokuttia oil and gas bearing region

Aquifer		$K_{2st}$	$P_{1jm}$	$P_2$	$P_{3ml}$	$N_{1pl}$	$N_{1vr}$
Number of samples		37	24	208	297	13	13
Depth, м		330–4101	345–4825	726–5373	240–5439	564–4227	606–2774
TDS, g/L	from-to	12.12–298.44	39.88–312.27	11.03–381.11	5.14–366.60	20.27–335.00	19.79–319.77
	modal series	55–228	140–201	53–334	31–329	168–308	21–92
$rNa/rCl$	from-to	0.41–0.88	0.49–0.88	0.49–0.90	0.30–1.29	0.45–0.90	0.67–0.94
	modal series	0.62–0.84	0.59–0.75	0.66–0.88	0.66–0.90	0.62–0.86	0.69–0.84
$rCa/rMg$	from-to	0.09–22.74	1.29–17.92	0.11–459.75	1.18–57.14	0.25–7.19	1.27–89.77
	modal series	1.03–5.5	3.01–6.80	3.60–12.14	0.20–7.22	1.73–4.95	1.27–5.64
$rSO_4 \times 100/rCl$	from-to	0.02–3.48	0.008–1.49	0.001–4.22	0.001–13.08	0.04–2.04	0.01–2.73
	modal series	0.01–0.29	0.05–0.18	0.07–0.38	0.06–0.76	0.11–0.43	0.02–0.27
Cl/Br	from-to	110.46–1731.95	92.96–1410.85	87.09–33537.81	48.97–51425.23	84.39–2077.12	180.77–4067.83
	modal series	1) 113–145 2) 368–628	92.96–342.16	272.49–920.50	370.25–842.25	84.39–609.71	195.21–418.35
$Br^-, mg/L$	from-to	44.1–1517.7	16.7–1642.8	1.6–1803.6	2.1–1483.8	18.8–2,271.2	12.0–496.2
	modal series	64.0–174.2	132.8–645.8	248.1–460.6	101.5–306.3	182.2–460.0	59.8–79.8
$J^-, mg/L$	from-to	0.8–127.0	3.3–46.9	0.72–65.5	0.21–84.6	9.9–90.8	2.5–71.8
	modal series	25.3–46.5	9.14–16.4	12.0–36.9	11.0–21.6	23.7–37.7	2.5–71.8

saline marine water (160–180 g/L; see Table 1), corresponding to the gypsum stage of evaporation.

Potash and rock salt deposits, gypsum, and anhydrite of the Vorotyshcha Formation clearly indicate formation within a shallow restricted lagoonal basin. Periodic isolation and reopening of the connecting strait permitted episodic inflow of marine water, accounting for the rhythmic alternation of salt layers and grey lagoonal clays (Fedushchak, 1972). TDS of water entrapped during sedimentation exceeded 300 g/L.

The formation of highly mineralised groundwater is possible through two mechanisms:

- Preservation or accumulation of parent brines from which various saline deposits precipitated.
- Dissolution of readily soluble evaporite deposits and leaching of soluble salts from salt-bearing rocks (Carpenter, 1978).

To determine groundwater genesis and the degree of its metamorphism, indicators expressing quantitative relationship between individual macro- and

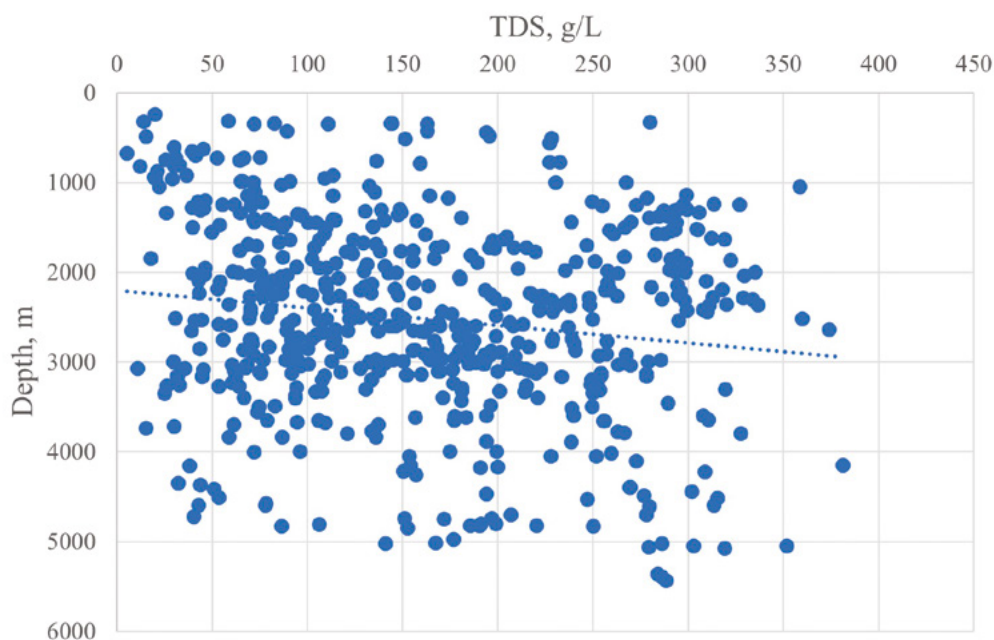
microcomponents of groundwater are used. Most commonly, the ratios  $rNa/rCl$  and  $rCa/rMg$  are applied for marine sedimentary waters. In seawater,  $rNa/rCl$  is 0.85, and  $rCa/rMg$  is 0.19. As a result of the metamorphism of marine waters during prolonged interaction with water-bearing rocks, the content of Ca increases at the expense of decreasing Mg and Na concentrations.

It is considered that lower  $rNa/rCl$  values and higher  $rCa/rMg$  values in water indicate a higher degree of metamorphism. Elevated  $rNa/rCl$  values may indicate a certain proportion of continental infiltration waters. With an increasing degree of seawater evaporation, these ratios also decrease (see Table 1). High  $rNa/rCl$  values in groundwater may also result from the leaching of halite (Kolodiy et al., 2009).

The sulphate coefficient, calculated as  $rSO_4 \times 100/rCl$ , in shallow aquifers (zones of active and limited water exchange) ranges from 10 to 500. Higher values may result from the leaching of sulphate-bearing rocks. In seawater, this ratio is 10.2.

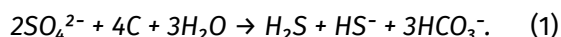
**Table 3.** Pearson's correlation coefficients of groundwater parameters of the Boryslav-Pokuttia oil and gas bearing region (calculated using Statistica software; sample size: 592 water samples)

Parameter	Depth	pH	TDS	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	J <sup>-</sup>	$\frac{rNa}{rCl}$	$\frac{rCa}{rMg}$	$\frac{rSO_4 \times 100}{rCl}$	$\frac{Cl}{Br}$
Depth	1.00	-0.12	0.24	0.14	0.36	0.19	0.14	0.24	0.03	-0.02	0.42	0.22	-0.29	0.08	0.02	-0.14
pH	-0.12	1.00	-0.50	-0.40	-0.53	-0.42	-0.18	-0.50	0.07	0.20	-0.34	-0.08	0.49	0.23	0.18	-0.07
TDS	0.24	-0.50	1.00	0.95	0.81	0.61	0.50	1.00	-0.14	-0.32	0.68	0.33	-0.61	0.00	-0.48	-0.14
Na <sup>+</sup>	0.14	-0.40	0.95	1.00	0.58	0.48	0.56	0.95	-0.13	-0.35	0.49	0.28	-0.37	-0.03	-0.48	-0.14
Ca <sup>2+</sup>	0.36	-0.53	0.81	0.58	1.00	0.59	0.25	0.81	-0.12	-0.17	0.83	0.32	-0.84	0.10	-0.34	-0.13
Mg <sup>2+</sup>	0.19	-0.42	0.61	0.48	0.59	1.00	0.27	0.62	-0.19	-0.22	0.52	0.25	-0.75	-0.16	-0.39	-0.01
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.14	-0.18	0.50	0.56	0.25	0.27	1.00	0.50	-0.06	-0.23	0.33	0.16	-0.16	-0.07	-0.24	-0.19
Cl <sup>-</sup>	0.24	-0.50	1.00	0.95	0.81	0.62	0.50	1.00	-0.15	-0.33	0.67	0.32	-0.62	0.00	-0.49	-0.14
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.03	0.07	-0.14	-0.13	-0.12	-0.19	-0.06	-0.15	1.00	0.16	-0.05	0.10	0.22	0.07	0.80	0.08
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.02	0.20	-0.32	-0.35	-0.17	-0.22	-0.23	-0.33	0.16	1.00	-0.22	-0.04	0.26	-0.10	0.30	0.18
Br <sup>-</sup>	0.42	-0.34	0.68	0.49	0.83	0.52	0.33	0.67	-0.05	-0.22	1.00	0.46	-0.65	0.05	-0.25	-0.27
J <sup>-</sup>	0.22	-0.08	0.33	0.28	0.32	0.25	0.16	0.32	0.10	-0.04	0.46	1.00	-0.27	0.00	-0.11	-0.26
$\frac{rNa}{rCl}$	-0.29	0.49	-0.61	-0.37	-0.84	-0.75	-0.16	-0.62	0.22	0.26	-0.65	-0.27	1.00	-0.06	0.40	0.05
$\frac{rCa}{rMg}$	0.08	0.23	0.00	-0.03	0.10	-0.16	-0.07	0.00	0.07	-0.10	0.05	0.00	-0.06	1.00	0.08	-0.04
$\frac{rSO_4 \times 100}{rCl}$	0.02	0.18	-0.48	-0.48	-0.34	-0.39	-0.24	-0.49	0.80	0.30	-0.25	-0.11	0.40	0.08	1.00	0.10
$\frac{Cl}{Br}$	-0.14	-0.07	-0.14	-0.14	-0.13	-0.01	-0.19	-0.14	0.08	0.18	-0.27	-0.26	0.05	-0.04	0.10	1.00



**Fig. 3.** Diagram of the relationship between groundwater mineralisation and aquifer depth within the Boryslav-Pokuttia oil and gas bearing region

Sulphate concentrations in waters are significantly lowered through bacterial sulphate reduction, a process occurring in anoxic conditions with the participation of organic matter following the below regime:



A clear indicator of water origin, regardless of its concentration, is the Chlorine-Bromine ratio (Cl/Br), since the metamorphic process does not affect Bromine; its content in metamorphosed solutions is primarily determined by its initial concentration (Kolodiy et al., 2009). In seawater, Cl/Br ratio is 288.26 decreasing significantly from the “visible halite” stage of seawater concentration (see Table 1). As a result of the metamorphism of marine sedimentary waters, this ratio decreases. High Cl/Br values (>1000) may result from leaching chloride salts from salt-bearing rocks or diluting sedimentary waters with freshwater.

Correlation analysis (assessing the strength and direction of linear relationships between two variables) of groundwater parameters in the Boryslav-Pokuttia OGBA revealed the following features (Table 3).

**Aquifer depth.** Its direct correlation with groundwater mineralisation (and with Ca, Mg, Cl, Br, I ion contents – listed here in order of correlation coefficient increasing) reflects an intensifying level of system hydrodynamic confinement with depth, preserving primary sedimentary waters. The inverse correlation between aquifer depth and  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  indicates an increase in the intensity of water metamorphism processes (replacement of Na by Ca from water-bearing rocks).

The distribution of highly mineralised brines in shallow aquifers, as well as brackish and saline waters in deeper horizons (Fig. 3), may indicate different geneses of these waters.

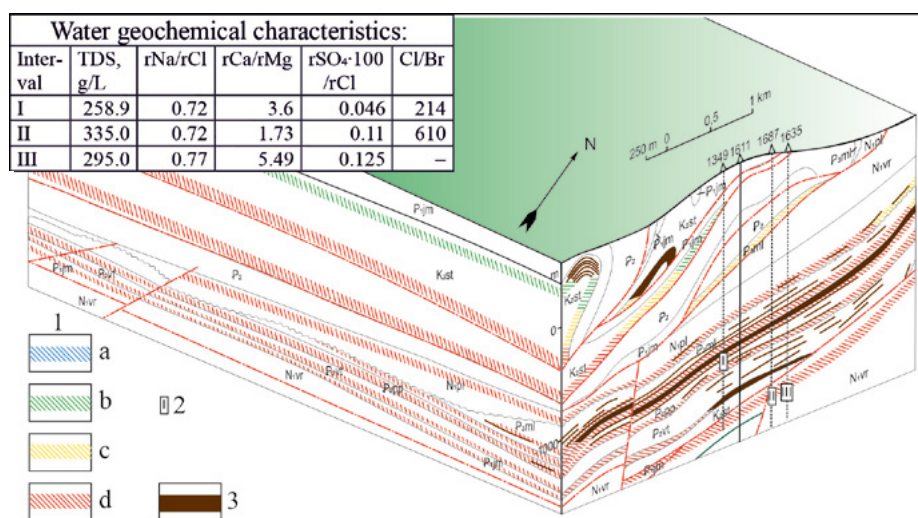
**Water mineralisation** shows a direct correlation with the of Cl, Na, Ca, Mg, Br,  $\text{NH}_4$ , and I ion contents. Its inverse correlation with  $\text{HCO}_3$  likely reflects enrichment of infiltrated waters in the active water exchange zone with these ions.

Studies on the genesis of highly mineralised groundwater in the Bilche-Volytsia oil and gas bearing region established a clear direct correlation between groundwater mineralisation and the Cl/Br ratio (most values reaching the low thousands). This is explained by leaching of clay-salt deposits of the Sambir-Rozhniativ formation and their subsequent expulsion into autochthonous reservoir rocks during the dynamo-elision cycle of hydrogeological history (Harasymchuk, Kolodiy, 2002; Harasymchuk et al., 2004).

In the Boryslav-Pokuttia OGBA, Cl/Br ratios in groundwater occasionally reach values in the low thousands, while most range between 84.39 and 920.5 (see Table 1), including the aquifer within clay-salt molasse deposits ( $\text{N}_1\text{vr}$ ). No correlation was observed between water mineralisation and the Cl/Br ratio (see Table 3).

**Na ion** shows the strongest correlation with Cl ( $r = 0.95$ ), reflecting the shared mechanism of concentration due to seawater evaporation. High correlations were also found with Ca,  $\text{NH}_4$ , Br, Mg, and I. Its inverse correlation with  $\text{SO}_4$  and  $\text{HCO}_3$  likely reflects the increasing contribution of low-mineralised infiltrated waters in the active water exchange zone.





**Fig. 5.** Block diagram of the hydrogeochemical settings of the Boryslav oil and gas condensate field (geological base after (Ivaniuta, 1998)). 1 – distribution of groundwater by TDS: a – <50 g/L, b – 50–100 g/L, c – 100–150 g/L, d – >150 g/L; 2 – well perforation interval (aquifer penetration); 3 – oil reservoir

**Boryslav Oil and Gas Condensate Field.** The Boryslav field is located within the city of Boryslav and its surrounding areas in the southwestern part of the Boryslav-Pokuttia zone, encompassing the Oriv and Berehove nappes of the folded Carpathians.

The field comprises four distinct structural-tectonic elements, i.e. the Oriv and Berehove nappes, the Boryslav deep fold, and the Boryslav subthrust. These structures are imbricated in a lens-like arrangement from southwest to northeast. The field represents a complex of hydrocarbon reservoirs at various depths, distributed across different levels of the Boryslav Nappe (Fig. 5).

The geological structure of the field includes tectonogenic flysch deposits from the Upper Cretaceous to the Oligocene, as well as Neogene molasse formations – the Polianytsia and Vorotyshcha suites. All of these formations are hydrocarbon-bearing (Ivaniuta, 1998).

The analysis of the field hydrogeochemical settings was based on the analysis of 62 water samples. Waters are predominantly Na-Cl and Ca-Na-Cl brines, except for shallow aquifers in the Oriv and Berehove nappes. Regardless of the depth of the aquifers, their lithological composition, stratigraphic complexes, or association with different structural-tectonic elements, formation waters are mostly medium to highly metamorphosed brines with TDS ranging from 49.9 to 374.0 g/L.

Oil and gas condensate reservoirs of the field are mainly located within zones of quasi-stagnant hydrodynamic conditions (characterized by highly mineralised and metamorphosed waters), which prevail at depths greater than 1,500 m (see Fig. 5).

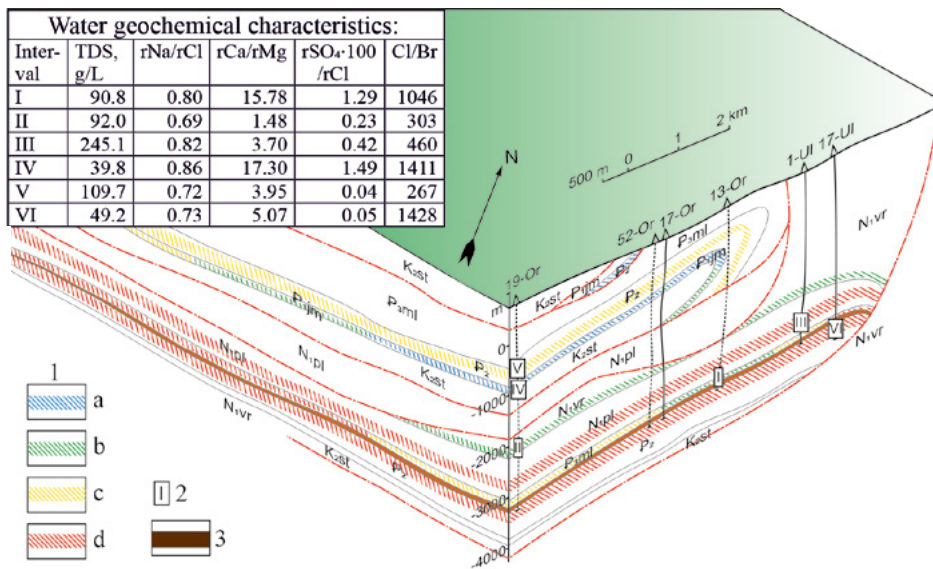
Hydrocarbon reservoirs at shallower depths are less common, though locally hydrodynamically iso-

lated structures may exist, providing favourable conditions for the formation and preservation of hydrocarbon accumulations. Additionally, waters in contact with oil reservoirs exhibit very low SO<sub>4</sub> contents, which, as noted above, result from ongoing sulphate reduction processes.

**Oriv-Ulychno Oil Field.** The field is located in the first structural fold tier in the northwestern part of the Boryslav-Pokuttia zone, 16 km away from the city of Drohobych. The Oriv and Ulychno reservoirs are developed individually, divided by a zone lacking industrially productive collectors. The Ulychno reservoir was penetrated by well No. 1-Ulychno. Within the 3,136–3,141 m interval of Menilite Formation deposits, an oil inflow of 8.6 t/d and a gas flow of 775 m<sup>3</sup>/d were obtained. The Oriv reservoir was penetrated by well No. 21-Oriv. The productive interval is also the Menilite Formation, with oil production of 48.5 t/d and gas production of 12.35 thousand m<sup>3</sup>/d within the 3,185–3,288 m interval (Ivaniuta, 1998).

The geological structure of the field includes flysch deposits of the Stryi, Yamna, Maniava, Vyhoda, Bystrytsia, and Menilite formations, as well as Neogene molasse deposits of the Polianytsia and Vorotyshcha formations.

Hydrogeochemical settings of the field were studied based on 21 water samples. Deep aquifer waters are predominantly Na-Cl, occasionally Ca-Na-Cl composition, while in shallower intervals, waters are mainly Ca-Na-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> composition. Overall, groundwater TDS increases from 36.9 to 285.6 g/L with increasing depth. Quasi-stagnant hydrodynamic conditions, favorable for hydrocarbon preservation, begin at depths greater than 2,500 m within the structure (Fig. 6).



**Fig. 6.** Block diagram of hydro-geochemical settings at the Oriv-Ulychno oil field (geological basis according to (Ivaniuta, 1998)). 1 – groundwater distribution by TDS: a – <50 g/L, b – 50–100 g/L, c – 100–150 g/L, d – >150 g/L; 2 – well perforation interval (aquifer penetration); 3 – oil reservoir

Oriv reservoir waters are distributed across a wide stratigraphic range, from the Upper Cretaceous Stryi Formation to the Neogene Vorotyschcha Formation. No systematic variations in mineralisation or chemical composition of waters are observed either across different-aged strata or at varying aquifer depths.

A characteristic feature of formation waters from non-productive wells of the Ulychne reservoir is their low mineralisation and low degree of metamorphism. Formation waters from productive wells, despite being sampled from strata of different ages, are characterized by significantly higher mineralisation than those from non-productive wells. This contrast may indicate isolated hydrodynamic conditions favourable for hydrocarbon preservation.

**Dolyna Oil Field.** The Dolyna oil field is located in the Dolyna District of the Ivano-Frankivsk Region, 5 km from the city of Dolyna. Tectonically, it is in the first fold tier of the central part of the Boryslav-Pokuttia zone.

The geological structure includes flysch deposits of the Upper Cretaceous (Stryi Formation), Paleocene (Yamna Formation), Eocene (Maniava, Vyhoda, and Bystrytsia formations), Oligocene (Menilite Formation), and Neogene molasse deposits (Polianytia and Vorotyschcha formations).

Hydrocarbons occur from the Vorotyschcha Formation of the Miocene to the Eocene, but commercial accumulations are found only in the Menilite, Bystrytsia, Vyhoda, and Maniava formations, where oil is hosted in sandstone and siltstone layers. Reservoirs share a common oil-water contact and are massive, layered dome-shaped tectonically sealed structures. The natural reservoir regime is elastic

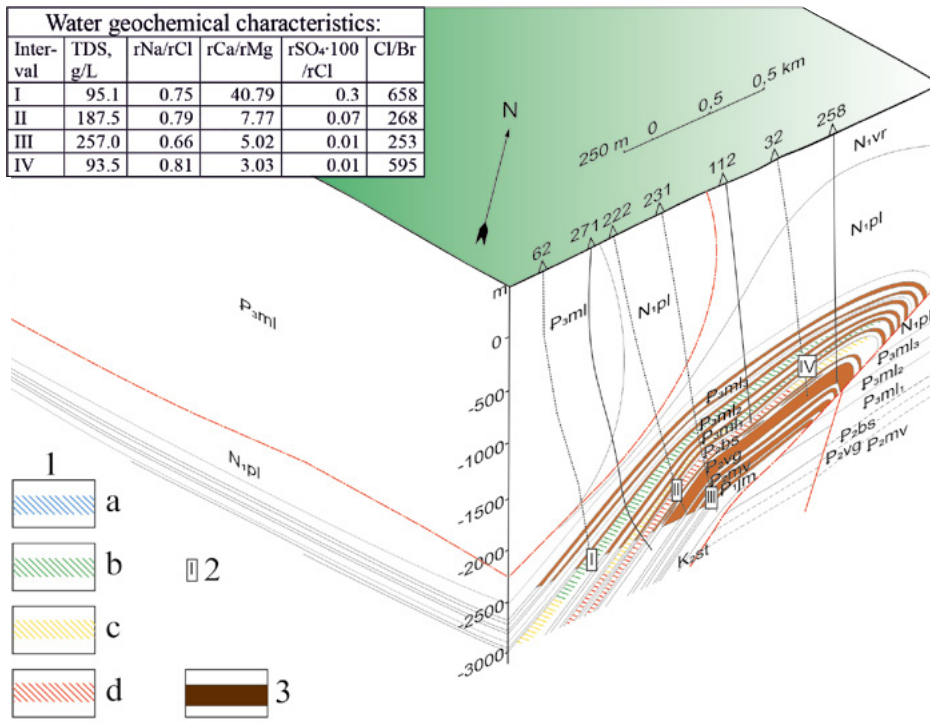
and gas-saturated. Initial recoverable reserves were 38,320 t of oil and 12,963 million m<sup>3</sup> of dissolved gas (Ivaniuta, 1998).

Aquifers of the Dolyna field are associated with Eocene and Oligocene reservoir rocks. Sandstone interbeds of the Vorotyschcha series (lower Miocene) are also aquifers. Formation water sampling was conducted in the 2,760–3,083 m interval, corresponding to hydrocarbon-bearing horizons. Waters are predominantly of Na-Cl, Ca-Na-Cl with occasional Ca-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl composition. No clear correlation between TDS in water (61–257 g/L) and depth within this interval was identified.

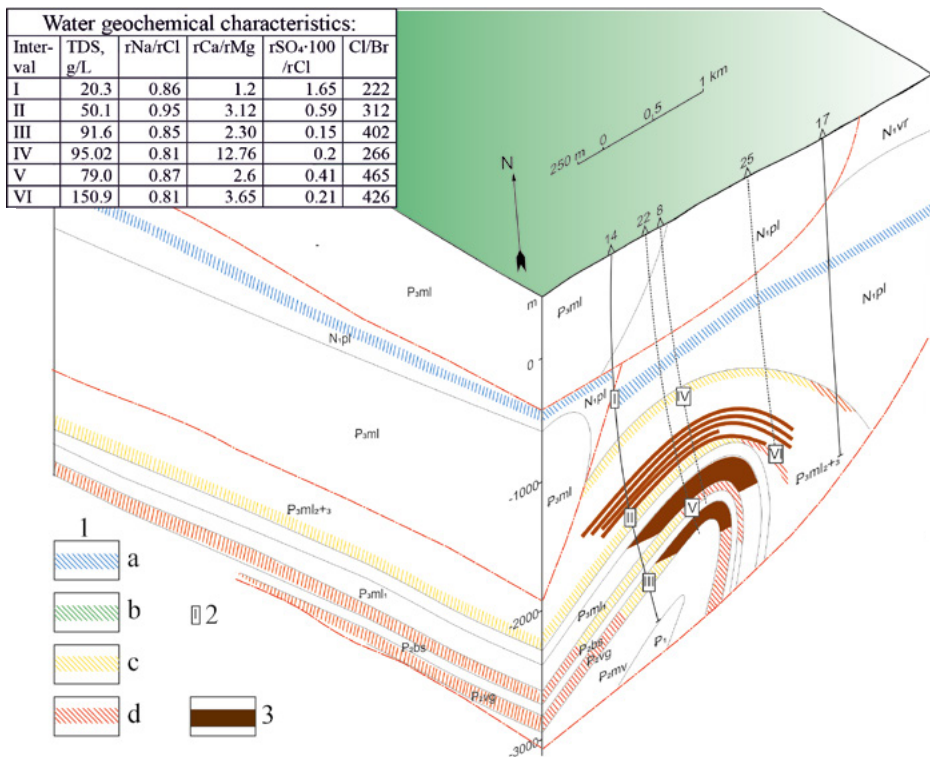
As with most Boryslav-Pokuttia region fields, Dolyna oil accumulations occur under hydrodynamic conditions favorable for preservation, reflected in high mineralisation and metamorphism of formation waters and low sulphate contents (Fig. 7).

**Strutyn Oil Field.** The Strutyn oil field is located in Rozhniativ District, Ivano-Frankivsk Region, 7 km away from the town of Rozhniativ. Major oil accumulations are hosted in the Vyhoda Formation and the lower Menilite subformation of the North-Strutyn and Strutyn blocks, explored by 36 wells (33 in lower Menilite reservoirs, 2 in Vyhoda Formation, and one intersecting both).

Tectonically, the field is associated with the Upper-Strutyn fold – an asymmetrical north-west trending anticline measuring 15×3.5 km. The geological structure of the Upper-Strutyn fold includes flysch deposits of the Upper Cretaceous (Stryi Formation), Paleocene, Eocene (Maniava, Vyhoda, Bystrytsia formations), Oligocene (Menilite Formation), and Neogene molasse deposits (Polianytia and Vorotyschcha formations) (Ivaniuta, 1998).



**Fig. 7.** Block diagram of hydro-geochemical settings at the Dolyna oil field (geological basis according to (Ivaniuta, 1998)). 1 – groundwater distribution by TDS: a – <50 g/L, b – 50–100 g/L, c – 100–150 g/L, d – >150 g/L; 2 – well perforation interval (aquifer penetration); 3 – oil reservoir



**Fig. 8.** Block diagram of hydro-geochemical settings at the Strutyn oil field (geological basis according to (Ivaniuta, 1998)). 1 – groundwater distribution by TDS: a – <50 g/L, b – 50–100 g/L, c – 100–150 g/L, d – >150 g/L; 2 – well perforation interval (aquifer penetration); 3 – oil reservoir

Aquifers are developed within Eocene deposits (Vyhoda and Bystriv formations), Oligocene (Menilite Formation), and Miocene (Polianytsia and Vorotyschcha formations). Sampling was conducted at depths ranging from 810 m to 3,555 m. Waters from shallow horizons are predominantly of Ca-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl, whereas deeper waters shift to Na-Cl or Ca-Na-Cl composition (Fig. 8).

A clear trend of increasing water mineralisation with depth is observed throughout the section, irrespective of stratigraphic horizon. Waters with TDS ranging from 7 to 35 g/L occur within the 810–2,650 m interval and likely contain mixtures of paleo- and modern infiltrated waters.

Oil accumulations are delineated by aquifers in which TDS exceeds 50 g/L and waters exhibit a pronounced degree of metamorphism.

**Bytkiv-Babche Oil and Gas Condensate Field.** The Bytkiv-Babche oil and gas condensate field is located in the Nadvirna District, Ivano-Frankivsk Region, 7 km away from the town of Nadvirna, and forms a part of Bytkiv oil-industrial area.

Structurally and tectonically, the field is associated with the Bytkiv fold group in the central part of the Borislav-Pokuttia subzone of the Inner Carpathian Foredeep. It is overlain by thrust, strongly deformed Paleogene and Upper Cretaceous deposits of the Skyba Zone of the Carpathian Folded Belt. The field features overthrust-listric tectonic style. Hydrocarbon reservoirs are localized within the Berehova thrust, within the first and second fold tiers of the Borislav-Pokuttia zone.

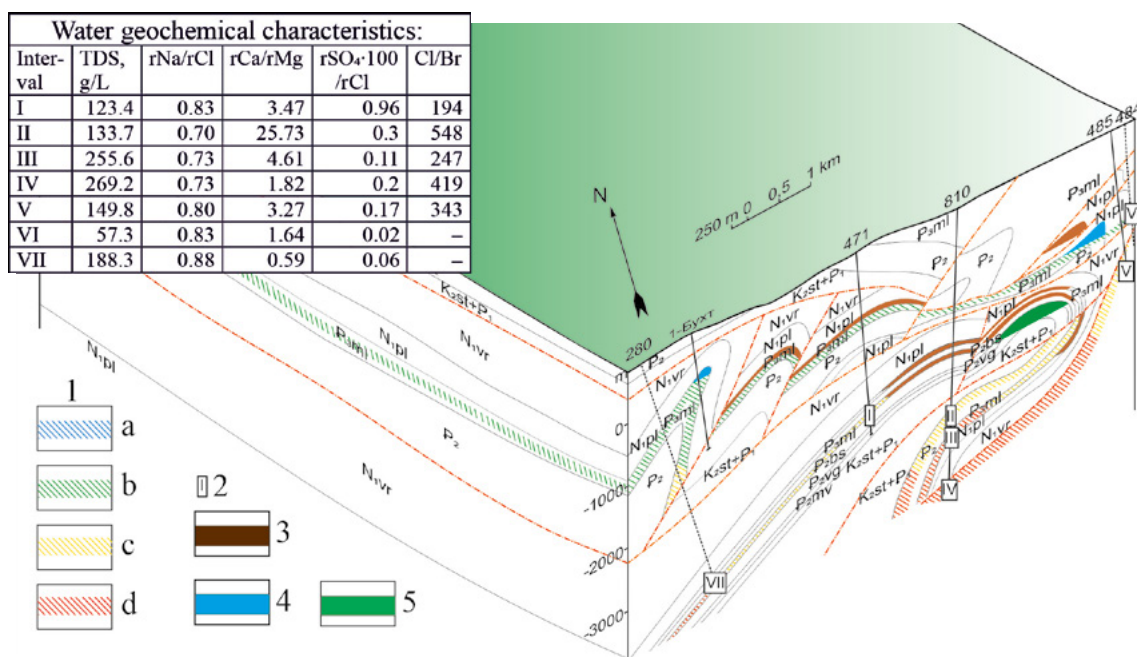
Hydrogeochemical analysis was carried out on 57 water samples. Aquifers are hosted in porous flysch reservoirs of the Upper Cretaceous (Stryi Formation,  $K_2st$ ), Eocene (Maniava  $P_2mv$ , Vyhoda  $P_2vg$  formations), and Oligocene (Menilite Formation,  $P_3ml$ ). Waters are predominantly of Na-Cl, less commonly Ca-Na-Cl composition. TDS ranges from 6 to 299 g/L and shows no systemic dependence with the stratigraphy or depth. Waters are generally metamorphosed, as indicated by  $rNa/rCl$  ratios lower than of seawater and slightly elevated  $rCa/rMg$  values; this pattern is also observed in weakly mineralised waters.

Unlike the previously analyzed fields, hydrocarbon accumulations (oil, gas condensate, gas) at the Bytkiv-Babche field are mostly associated with waters exhibiting TDS of 50–100 g/L (Fig. 9). According to Cl/Br genetic ratios, the majority of waters fall within the evaporitogenesis interval, extending from Black Sea water to the onset of halite deposition. Low  $rSO_4 \times 100/rCl$  values in contour and basal waters indicate active sulphate reduction processes.

## 5. Conclusions

In the Borislav-Pokuttia OGBA, principal factors controlling the hydrogeochemical characteristics of aquifers are paleohydrogeological evolution and the level of hydrogeological isolation. Prolonged and intensive dynamo-elisional processes, thrust-folded structure, numerous disjunctive faults, and the presence of salt-bearing deposits have resulted in the formation of a complex hydrogeochemical system that lacks distinct structural zonation.

Most aquifer waters are highly mineralised Na-Cl brines, Ca-Na-Cl or Mg-Ca-Na-Cl brines occur less commonly. Genetically, these are residual sedimentary brines derived from salt basins at various stages of concentration. Brines formed through leaching of salt-bearing molasses occur less frequently. The first type is distinguished by elevated concentrations of trace elements and distinctive genetic indicators.



**Fig. 9.** Block diagram of hydrogeochemical settings at the Bytkiv-Babchyn oil and gas condensate field (geological basis according to (Ivaniuta, 1998)). 1 – groundwater distribution by TDS: a – <50 g/L, b – 50–100 g/L, c – 100–150 g/L, d – >150 g/L; 2 – well perforation interval (aquifer penetration); 3 – oil reservoir; 4 – gas reservoir; 5 – gas condensate reservoir

The presence of highly mineralised waters in flysch reservoirs is attributed to their expulsion from clayey-salt Miocene molasses and the replacement of ancient sedimentary or infiltration waters during the dynamo-elisional stage of hydrogeological evolution. Mixtures of these three water types predominate.

Less frequently, aquifers contain mineralised and saline waters (TDS < 30 g/L) enriched in HCO<sub>3</sub> and SO<sub>4</sub> contents. Geochemically, these are identified as mixtures of ancient or modern infiltration waters with sedimentary thalassogenic ones. These waters are found within zones of active or restricted water exchange at depths up to 2,000–2,500 m.

The final stage influencing groundwater hydrogeochemistry was metamorphism, manifested by depletion of Na and Mg as a result of ion-exchange reactions with water-bearing rocks. These processes developed only in hydrogeologically closed structures and depended on the duration and intensity of water-rock interaction.

The formation of hydrocarbon accumulations in the Boryslav-Pokuttia OGBA is associated with the final cycle of its paleohydrogeological development – the dynamo-elision stage. During this stage, highly mineralised brines from clayey salt-bearing molasse were expelled into reservoir rocks. These brines are characterized by specific geochemical parameters that minimize the biochemical oxidation of hydrocarbons. During the dynamo-elision stage, hydrodynamically closed traps were formed, which contributed to the mechanical preservation of the accumulations.

Indirect hydrogeochemical indicators of hydrocarbon potential in the Boryslav-Pokuttia region include high mineralisation and water metamorphism, Na-Cl or Ca-Na-Cl composition, enrichment in microcomponents, and low SO<sub>4</sub> concentrations. Collectively, these characteristics indicate a closed hydrogeodynamic system offering favourable conditions for the formation and preservation of hydrocarbon accumulations.

Метою цього дослідження було вивчення гідрогеохімічних характеристик водоносних горизонтів Бориславсько-Покутського нафтогазоносного району, дослідження генези підземних вод та їх впливу на умови формування та збереження вуглеводневих скучень, а також ідентифікація гідрогеохімічних критеріїв нафтогазоносності. Методологія дослідження спиралася на статистичну та графічну обробку архівних даних і подальшу інтерпретацію отриманих результатів. Також було застосовано палеогідрогеологічний аналіз.

Було встановлено, що основними факторами, що контролюють гідрогеохімічні параметри водоносних горизонтів у цьому районі, є палеогідрогеологічна еволюція та ступінь гідрогеологічної ізоляції. Тривалий та інтенсивний динамо-елізійний розвиток, складчасто-насувна будова, численні диз'юнктивні розломи та наявність соленосних відкладів призвели до формування складної гідрогеохімічної системи, яка не має чіткої зональності.

Генетично більшість вод є седиментогенними залишковими розсолами евапоритових басейнів або розсолами, що утворилися внаслідок вилуговування соленосних моласових відкладів, а також їх сумішами. На невеликих глибинах зрідка трапляються мінералізовані та солоні води, збагачені гідрокарбонатами та сульфатами. На основі геохімічних показників ці води ідентифікуються як суміші давніх або сучасних інфільтраційних вод із седиментогенними таласогенними водами.

Непрямі гідрогеохімічні критеріями нафтогазоносності Бориславсько-Покутського нафтогазоносного району є такі: висока мінералізація та метаморфізація вод, їх Na-Cl або Ca-Na-Cl склад, збагачення мікроелементами та мікрокомпонентами, а також низька концентрація сульфатів. У сукупності ці ознаки вказують на замкнуту гідродинамічну систему, сприятливу для формування та збереження скучень вуглеводнів.

## References

- Birkle Peter, García Bernardo Martínez, Padrón Carlos, Miland M. 2009. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecominoacán oil reservoir, Gulf of Mexico. Part 1: Chemical evolution and water-rock interaction. *Applied Geochemistry*, 24 (4), 543–554. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.12.009>
- Cai Chuan, Qiu Nansheng Liu Nian, Li Zhenming, Wang Yuanjie, Yu Zhanwen, Gao Ting, Jiao Yaxian. 2022. Geochemistry of formation waters and crude oils in the Shulu Sag, Bohai Bay Basin, NE-China, to assess quality and accumulation of hydrocarbons. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 10, 1, 10057. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110057>
- Carpenter A.B. 1978. Origin and Chemical Evolution of Brines in Sedimentary Basins. *SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas. Paper Number: SPE-7504-MS. <https://doi.org/10.2118/7504-MS>
- Cortes J.E., Muñoz L.F., Gonzalez C.A., Niño J.E., Polo A., Suspes A., Sichoque S.C., Hernández A., Trujillo H. 2016. Hydrogeochemistry of the formation waters in the San Francisco field, UMV basin, Colombia – A multivariate statistical approach. *Journal of Hydrology*, 539, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.010>
- Dresel P.E., Rose A.W. 2010. Chemistry and origin of oil and gas well brines in western Pennsylvania: *Pennsylvania Geological Survey, 4th ser.*, Open-File Report OFOG 10–01.0, 48.
- Fedushchak M.Yu. 1972. Paleogeography of the Precarpathian Basin during the formation of exotic conglomerates. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 29, 84–89 (in Ukrainian).
- Harasymchuk V.Yu., Kolodiy V.V. 2002. Origin and conditions of formation of underground waters of the Lopushna oil field in the southeastern part of the Precarpathian Basin. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 3, 21–36 (in Ukrainian).
- Harasymchuk V.Yu., Kolodiy V.V., Kulynych O.V. 2004. Genesis of highly concentrated brines in thrust deposits of the southeastern part of the Outer Zone of the Precarpathian Basin. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 4, 105–119 (in Ukrainian).
- Havrylenko K.S., Demediuk M.S., Arkhildieva E.O. 1971. Comparative characteristics of the chemical composition of groundwater in the Precarpathian and Transcarpathian depressions in terms of assessing the oil and gas potential of the subsoil. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 27, 52–60 (in Ukrainian).

- Holland H.D. 1978. The chemistry of the atmosphere. New York, Interscience Publishers (John Wiley and Sons).
- Ivaniuta M.M. (Ed.). 1998. Atlas of oil and gas fields of Ukraine: Vol. 5. Western oil and gas region. Lviv: Center of Europe (in Ukrainian).
- Kolodiy V.V. (Ed.). 2004. Carpathian oil and gas province. Lviv-Kyiv: Ukrainian Publishing Center LLC (in Ukrainian).
- Kolodiy V.V., Kolodiy I.V., Maievskiy B.Y. 2009. Oil and Gas Hydrogeology. Ivano-Frankivsk: Fakel (in Ukrainian).
- Kolodiy V.V., Sprynskiy M.I., Pankiv R.P., Haievskiy V.G. 1996. Rare alkaline elements in formation waters of the Lopushna oil field. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 1-2, 45-53 (in Ukrainian).
- Krushelnyska L., Valo M. (Eds.). 2000. Balthazar Hackett – researcher of South-Eastern and Central Europe. Lviv (in Ukrainian).
- Luan Guoqiang, Dong Chunmei, Azmy Karem, Fu Li-Yun, Lin Chengyan, Ren Lihua, Changying Shi, Jia Li. 2022. Hydrogeochemistry of oil-field formation water in relation to diagenesis of reservoirs: A case study from Shahejie formation, Dongying Depression. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 216, 110822. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110822>
- Pavlyuk M., Lazaruk Ya., Shlapinsky V., Savchak O., Kolodiy I., Ternavsky M., Hryvniak H., Huzarska L., Kovalchuk N. 2021. The formation and criteria of oil- and gas-bearing potential of hydrocarbon accumulations of the western oil-gas region of Ukraine. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 1-2 (183-184), 14-44. <https://doi.org/10.15407/ggcm2021.01-02.014>
- Romaniuk A.F., Lykhomanova I.M., Tesliar I.F. 1973. About hydrochemical anomalies in Paleogene deposits of the Rosilna and Kosmach gas condensate fields. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 34, 59-64 (in Ukrainian).
- Shchepak V.M. 1971. The significance of ammonium in underground waters of the Carpathian Foredeep for oil and gas exploration. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 23, 83-91 (in Ukrainian).
- Shtohryn O.D., Havrylenko K.S. 1968. Underground waters of the western regions of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
- Sprynskiy M. 1998. Origin of Lithium, Rubidium, Cesium and Strontium in Formation Water of Autokhthon Mesozoic Deposits of Pokuttia-Bukovyna Carpathians. Abstracts of Carpathian-Balkan Geological Association, 16 Congress, 587.
- Temniuk F.P., Senkovska S.S., Lisovenko L.F. 1973. Sedimentation conditions during the Cretaceous and Paleogene periods in the Precarpathian Basin. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 34, 21-30 (in Ukrainian).
- Tolwinsky K. 1921. On the oil deposits and underground waters of Boryslav against the background of geological structure. Przemysł: Naftowa Warsaw.
- Xinong Xie, Zhonghai Fan, Xiaofeng Liu, Yongchao Lu. 2006. Geochemistry of formation water and its implication on overpressured fluid flow in the Dongying Depression of the Bohaiwan Basin, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 89 (1-3), 432-435. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.11.026>

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.355864>

UDC [556.388:539.16]:519.87:504.064.2(477.41)

## Radioactive Contamination of Groundwater in the Chernobyl Exclusion Zone: Current Status, Long-Term Trends, and Challenges in Monitoring System Modernization

E-mail: [dmitri.bugay@gmail.com](mailto:dmitri.bugay@gmail.com),  
<https://orcid.org/0000-0002-2404-5639>

Received / Надійшла до редакції:  
05.10.2025

Received in revised form /  
Надійшла у ревізованій формі:  
06.02.2026

Accepted / Прийнята:  
20.03.2026

D.O. Bugai

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

**Радіоактивне забруднення підземних вод у Чорнобильській зоні відчуження: сучасний стан, довгострокові тенденції та актуальні питання модернізації системи моніторингу**

Д.О. Бугай

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

**Keywords:** Chernobyl Exclusion Zone, groundwater contamination, strontium-90, radionuclide migration, monitored natural attenuation, groundwater monitoring, radioactive waste disposal sites.

**Ключові слова:** Чорнобильська зона відчуження, забруднення підземних вод, стронцій-90, міграція радіонуклідів, моніторинг природного самоочищення, моніторинг підземних вод, пункти захоронення РАВ.

Groundwater contamination by radionuclides in the Chernobyl Exclusion Zone (CEZ) has been recognized since the early post-accident period (i.e., May – June 1986), when large-scale protective measures were implemented, as a potential pathway for the transport of radioactivity to the river network of the Pripyat–Dnipro basin. This study reviews long-term monitoring data and research results on radioactive contamination of groundwater in the CEZ, with particular attention to spatial patterns, temporal trends, and implications for monitoring and management strategies. Analysis of monitoring datasets for the period 1989–2024 shows that  $^{90}\text{Sr}$  remains the primary contaminant of concern in groundwater, with concentrations locally reaching  $10^5$ – $10^6$  Bq  $\text{m}^{-3}$  in areas influenced by radioactive waste burial sites and contaminated water bodies. In contrast,  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in groundwater are generally low, typically below 100 Bq  $\text{m}^{-3}$  and well below the drinking water standard. Long-term trends indicate an overall stabilization and gradual decline of  $^{90}\text{Sr}$  concentrations in the majority of monitoring wells over the last decade, reflecting depletion of the source term and natural attenuation processes in the vadose zone and aquifer.

These observations, together with the results of modelling analyses reviewed in this paper, support the strategy of monitored natural attenuation (MNA) as an appropriate approach for managing contaminated groundwater in the CEZ, provided that reliable monitoring demonstrates plume stability and acceptable risk levels for potential receptors, including the Pripyat River. At the same time, the existing groundwater monitoring system has several limitations related to monitoring well design, spatial coverage, and sampling methodologies. Results from detailed polygon field studies show that higher radionuclide concentrations may occur in specific hydrogeological zones that are not adequately captured by the current monitoring network.

The paper discusses priorities for modernization of the groundwater monitoring system in the CEZ, including optimization of monitoring objectives, improvement of monitoring well design and sampling methods, integration of geochemical and radiological observations, and development of updated methodological guidance. Modernization of the monitoring system will enable more reliable assessment of contaminant migration and provide a stronger scientific basis for long-term management of radioactive groundwater contamination in the CEZ.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2026. 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 National Academy of Sciences of Ukraine, 2026. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Citation: Bugai D.O. 2026. Radioactive Contamination of Groundwater in the Chernobyl Exclusion Zone: Current Status, Long-Term Trends, and Challenges in Monitoring System Modernization. *Geologičnij žurnal*, 1 (394), 73–90. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.355864>

Цитування: Бугай Д.О. Радіоактивне забруднення підземних вод у Чорнобильській зоні відчуження: сучасний стан, довгострокові тенденції та актуальні питання модернізації системи моніторингу. *Геологічний журнал*. 2026. № 1 (394). С. 73–90. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.355864>

## 1. Introduction

Radioactive contamination of groundwater in the Chernobyl Exclusion Zone (CEZ) has been considered, since the first days following the Chernobyl accident, as a potentially significant pathway for the off-site transport of radionuclides to the river network and to downstream territories within the Dnipro River basin (IAEA, 1999, 2006a; Sobotovich, Olshtinsky, 1992). Sources of radioactivity within the CEZ include the Chernobyl NPP industrial site with the Shelter Object (SO), currently covered by the New Safe Confinement (NSC), engineered radioactive waste disposal facilities (RWDF), trench-type near-surface radioactive waste burial sites (such as the Red Forest site), areas with surface contamination of topsoil by radioactive fallout, and contaminated water bodies such as the ChNPP cooling pond (Antropov et al., 2001; IAEA, 2006a).

The hydrogeological conditions of the CEZ, which is characterized by a moderately humid continental climate (precipitation about 600 mm/y), relatively flat topography, sandy and permeable surficial Quaternary deposits, and a shallow groundwater table (e.g., often only 1–2 m deep in river floodplain and terrace areas), generally promote radionuclide migration into the groundwater system (Bugai et al., 1996a, 2022). Trends toward warmer conditions, increased evapotranspiration, and higher hydroclimatic variability have become increasingly evident in recent decades (Matsala et al., 2021; Boychenko et al., 2025). However, these changes have not yet resulted in significant (e.g., 1 m or more) shifts in mean multi-annual groundwater levels. A detailed description of the site geology and hydrogeology can be found in Dzhepo and Skalskyy (Dzhepo, Skalskyy, 2002) and Matoshko (Matoshko, 1995, 1996; Matoshko et al., 2004).

To protect the Pripjat River from radioactively contaminated groundwater, large-scale protective measures were implemented in May–June 1986. These included drainage barriers consisting of hundreds of interception wells and the construction of a clay cut-off wall (slurry wall) around the Chernobyl Nuclear Power Plant. Later, these measures were recognized as excessive: the drainage barriers were never put into operation and were subsequently dismantled (IAEA, 1999; Voitsekho-vych et al., 2007).

Modelling studies conducted during the first decade after the accident indicated relatively low releases of radioactivity from contaminated catchments within the Exclusion Zone to the Dnipro River

system, suggesting that large-scale and costly water-protection measures were not justified (Bugai et al., 1996a). At the same time, particular attention was focused on the ChNPP cooling pond, as seepage from this reservoir represented one of the main sources of  $^{90}\text{Sr}$  contamination of the Pripjat River (IAEA, 2019). In addition, intensive migration of radionuclides to groundwater was identified at the so-called radioactive waste temporary storage sites (RWTSS)—trench-type radioactive waste burial sites created during the emergency response and cleanup operations in the near zone of the ChNPP (Il'ichev, Akhunov, 1992; Dzhepo, Skalskyy, 2002). Concerns were also raised regarding the potential migration of radionuclides into groundwater from highly contaminated soils at the ChNPP industrial site and from the Shelter Object (Panasiuk et al., 1999; Shestopalov et al., 2002).

In recent decades, several measures have been implemented that have improved the protection of groundwater from radioactive contamination in the near zone of the ChNPP. In particular, the drainage of the cooling pond in 2014 resulted in a decline in groundwater levels at the ChNPP industrial site and at the locations of the RWTSS (IAEA, 2019). In addition, the construction of the New Safe Confinement in 2016 over the destroyed Unit 4 significantly reduced the infiltration of atmospheric precipitation into the Shelter Object, thereby decreasing the potential for radionuclide leaching. A recent statistical analysis of groundwater monitoring data from a set of representative monitoring wells revealed a prevailing trend toward stabilization and decline of radioactive contamination levels in groundwater at most facilities within the Exclusion Zone (Bugai et al., 2022).

At the same time, groundwater monitoring in the CEZ remains an important task for ensuring compliance with licensing requirements for radioactive waste storage and disposal facilities, such as the Buryakivka RWDF and the Vector complex, as well as for providing information needed to support strategies for the management of contaminated groundwater based on monitoring of natural attenuation processes (MNA). Groundwater monitoring is also of significant scientific interest, as the Chernobyl Exclusion Zone represents a unique “open-air laboratory” for investigating the processes controlling the long-term migration and fate of radionuclides in soils and groundwater systems (Smith, Beresford, 2005; IAEA, 2006a; Bondarkov et al., 2011; Beresford et al., 2016).

The aim of this article is to review and analyse available data on radioactive contamination of groundwater in the Chernobyl Exclusion Zone, including an extended analysis of long-term trends in radionuclide concentrations. The paper also evaluates the objectives of groundwater monitoring, identifies key limitations and gaps in the existing monitoring system, and discusses priorities for its further development and improvement.

## 2. Data sources

### 2.1 Groundwater monitoring programmes

The principal source of information on radioactive contamination of groundwater in the CEZ is provided by groundwater monitoring programmes implemented by the State Specialized Enterprises (SSE) “Ecocenter” and “ChNPP”.

The main groundwater monitoring programme in the CEZ is implemented by Ecocenter and includes approximately 150 monitoring wells (Fig. 1). The monitoring network covers major potential sources of groundwater contamination, including RWTSS, the RWDF Pidlisnyi and “3rd Stage ChNPP”, the ChNPP cooling pond and Lake Azbuchyn, the Pripyat town area (within the floodplain and the first terrace of the Pripyat River), the Buryakivka RWDF, and the surroundings of former villages of Kopachi and Chystohalivka located within the fluvioglacial Chystohalivsky moraine ridge. The sampling frequency of monitoring wells varies from monthly to once every six months. Radiological analyses are carried out on unfiltered samples (Kireev et al., 2013; Bugai et al., 2022).

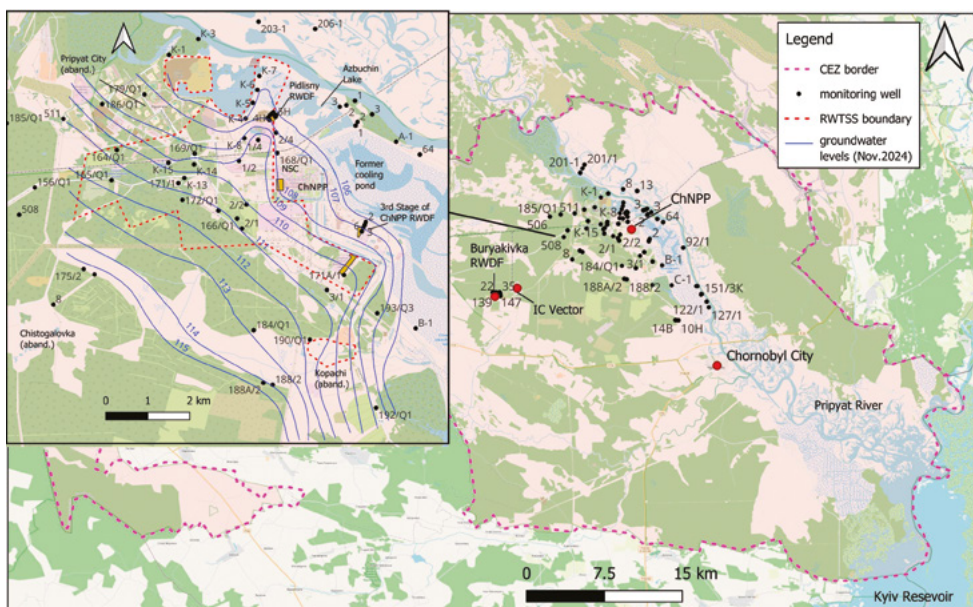
The main groundwater monitoring network of Ecocenter in the ChNPP near zone was constructed in 1989–1991. These include wells numbered 1/1, 1/1-D, 2/2, etc., as well as K-1, K-2, etc. (see Fig. 1). In 1995–1997, the observation well network in the ChNPP near zone was expanded using wells of a more modern design with PVC casing columns and shorter (2–3 m) screens (wells of series 160, 170, 180, and 190). These wells allowed a partial expansion of monitoring observations to peripheral areas of the RWTSS, the city of Pripyat, and the village of Kopachi.

Importantly, the 1989–1991 wells, which still constitute the core of the monitoring network of the Ecocenter, have several design flaws that do not meet modern standards, including:

- use of casing made from corrodible material (iron);
- long 12 m screens, which promote vertical mixing and crossflows;
- lack of proper sealing of the wellhead and screened interval.

The ChNPP monitoring programme includes approximately 120 wells located within the Chernobyl NPP industrial site and the New Safe Confinement – Shelter Object (NSC–SO) complex, where sampling is conducted once per month.

The groundwater monitoring system at ChNPP industrial site was installed in 1989 and was initially based on wells with iron casing with 12 m long screens. However, this system has undergone several modernizations, and as of 2024, the wells of outdated design were replaced with individual wells or multi-level well clusters with PVC casing and 2–3 m long screens.



**Fig. 1.** Overview maps of the groundwater monitoring network of the SSE Ecocenter in the Chernobyl Exclusion Zone

For both monitoring programmes, the main monitored parameters are groundwater levels and concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in groundwater.

Over the last decade, the EcoCenter monitoring programme has effectively become the only continuous source of data on the dynamics of radioactive groundwater contamination in the CEZ at the site-scale, and these data form the main basis for the analysis presented in this paper.

## 2.2 Experimental field studies and site investigations

Additional information on groundwater contamination processes has been obtained from experimental field studies (“polygon studies”) conducted primarily by the Institute of Geological Sciences (IGS) during 1995–2015. In 1995–1998, IGS established a network of small-diameter wells (1–2 inches) screened in the upper part of the unconfined Quaternary aquifer in the near zone of the Chornobyl NPP, comprising more than 100 observation points. These investigations enabled the development of a detailed map of  $^{90}\text{Sr}$  contamination in groundwater (Dzhepo, Skalsky, 2002). However, monitoring within this network was subsequently discontinued.

In 1999–2001, IGS together with the University of British Columbia (Canada) conducted investigations in the experimental catchment of the Borshchi stream located in the near zone of the ChNPP, with particular attention to groundwater contamination processes (Freed et al., 2004).

Later, during 2000–2015, IGS in cooperation with the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN) and the Ukrainian Institute of Agricultural Radiology carried out detailed monitoring studies at the experimental site near trench No. 22 of the “Red Forest” RWTSS (Van Meir et al., 2009; Bugai et al., 2012a). These studies provided detailed information on hydrogeological parameters, including infiltration recharge and groundwater flow velocities, as well as geochemical parameters, such as radionuclide ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) sorption coefficients (Kd). The investigations also resulted in the development of conceptual and numerical models of radionuclide migration processes (Bugai et al., 2012a; Le Coz et al., 2023).

In addition, one-time groundwater surveys were conducted by various organizations during the characterization of radioactive waste trenches within RWTSS sectors (Il'ichev, Akhunov, 1992; Ledenev et al., 1995; Bugai et al., 2020).

In 1996–2017, extensive groundwater investigations at the Shelter Object area were carried out by the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants (ISPNNP) (Litvin et al., 2016; Panasiuk et al., 2018, 2019).

However, experimental polygon-type investigations in the near zone of the ChNPP have largely ceased during the past decade. The only recent example is a small research project on  $^{137}\text{Cs}$  in groundwater initiated by Kyoto University (Fujikawa et al., 2024).

Comparison of the results of these experimental studies with the EcoCenter monitoring data presented below indicates that the current monitoring system has several limitations, highlighting the need for further improvement and modernization of groundwater monitoring in the CEZ.

## 3. Overview of groundwater monitoring data and modelling studies

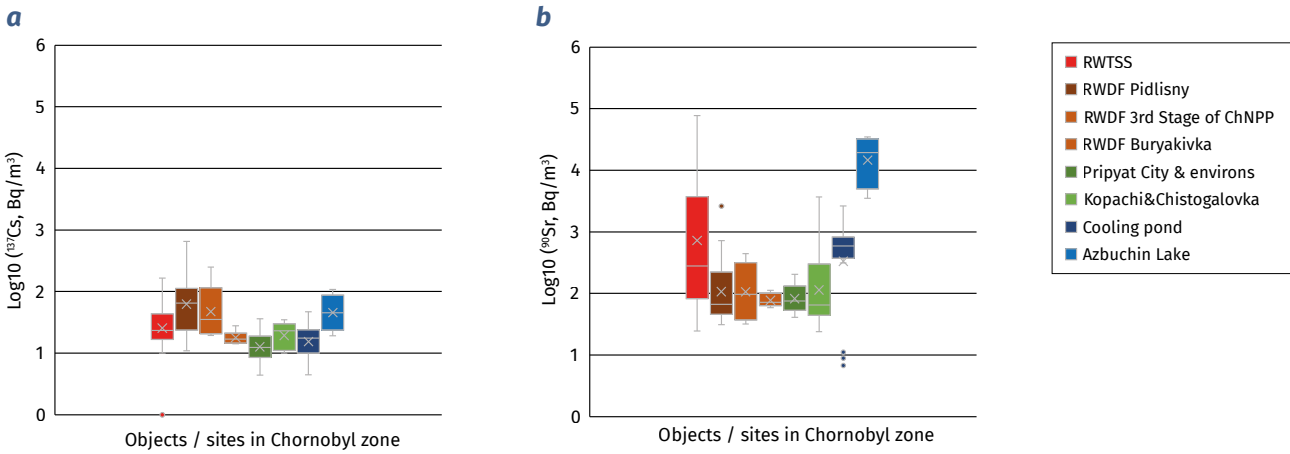
### 3.1 Radioactive contaminants of concern

Data on groundwater monitoring in the CEZ during the post-accident period are summarized in Bugai et al. (Bugai et al., 1996a, 2022), Dzhepo and Skalsky (Dzhepo, Skalsky, 2002), Kireev (Kireev et al., 2013, 2024), Panasiuk (Panasiuk et al., 2019), and Sato (Sato et al., 2023). A review of these sources, combined with the analysis of monitoring databases of SSE EcoCenter presented below, indicates that the main groundwater contaminant of concern in the CEZ is  $^{90}\text{Sr}$ . Its concentrations in groundwater at certain locations as of 2024 reached  $10^5$ – $10^6$  Bq/m<sup>3</sup>. For comparison, the permissible concentration of  $^{90}\text{Sr}$  in drinking water according to the Ukrainian regulatory standard GN 6.6.1.1-130-2006 (DR-2006) is 2000 Bq/m<sup>3</sup> (see Fig. 2a).

Concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  in groundwater in the CEZ at most monitoring sites of SSE EcoCenter, as of 2024, did not exceed 100 Bq/m<sup>3</sup>, which is about an order of magnitude lower than the regulatory standard GN 6.6.1.1-130-2006 (2000 Bq/m<sup>3</sup> for this radionuclide) (see Fig. 2b). Concentrations of plutonium isotopes and  $^{241}\text{Am}$  in groundwater in the CEZ are relatively low, typically below 1 Bq/m<sup>3</sup>, and therefore do not pose significant radiological risks.

Considering these observations, groundwater monitoring programmes in the CEZ have been primarily focused on measuring concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$ .

The relatively high mobility of  $^{90}\text{Sr}$  in groundwater, compared with  $^{137}\text{Cs}$  and plutonium isotopes, has also been reported at other nuclear legacy sites, including the Sellafield site in the UK (Sellafield Ltd., 2017) and Chalk River Nuclear Laboratories in Canada (IAEA, 2004).



**Fig. 2.** Whisker plot of log-transformed radionuclide concentrations in groundwater in monitoring wells at different objects / sites in Chernobyl zone in 2024 (based on data of the SSE EcoCenter): a) <sup>137</sup>Cs activity in monitoring wells; b) <sup>90</sup>Sr activity in monitoring wells

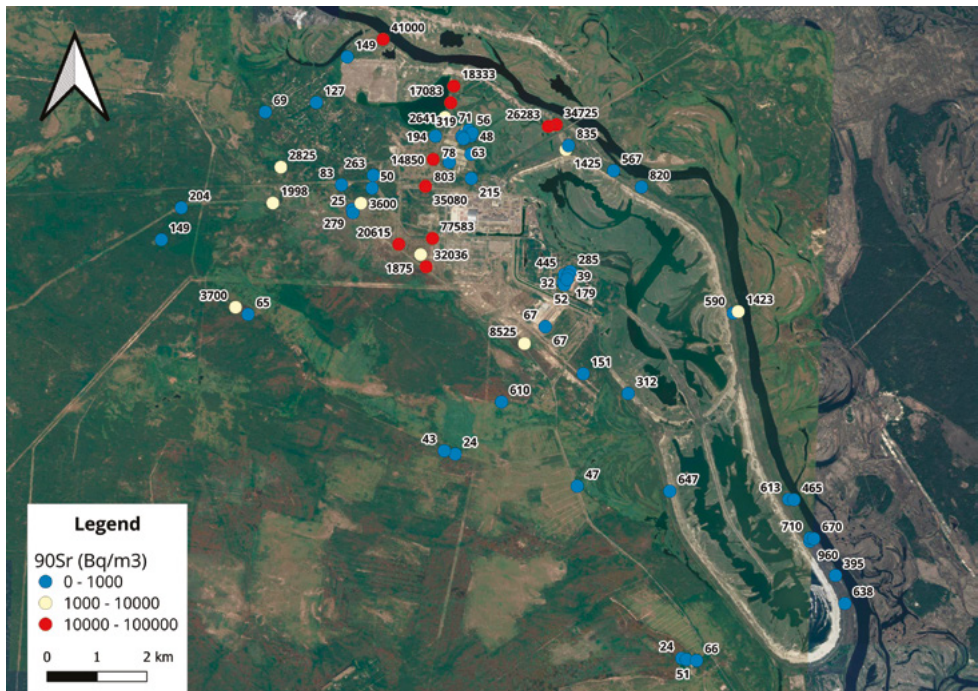
### 3.2 Spatial groundwater contamination patterns and hotspots

Groundwater concentrations of <sup>90</sup>Sr in monitoring wells of the SSE EcoCenter within the 10-km zone of the ChNPP showed high variability in 2024, ranging from 10<sup>2</sup> to 10<sup>5</sup> Bq/m<sup>3</sup> (see Fig. 3). In many wells, these concentrations exceeded the DR-2006 drinking water standard.

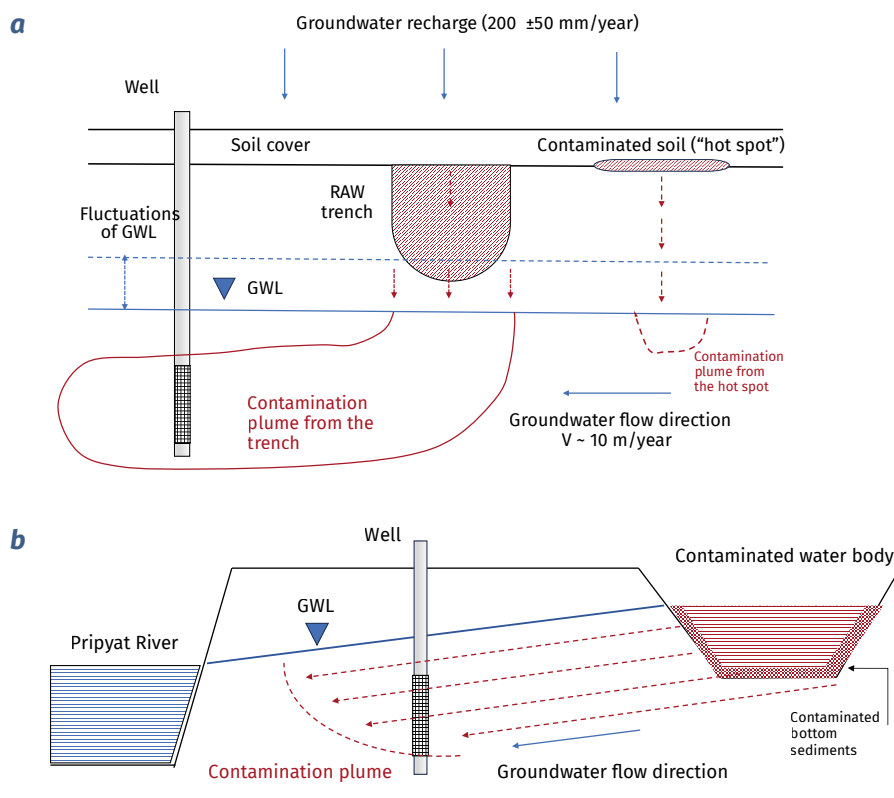
The variability of groundwater contamination by <sup>90</sup>Sr is evidently caused by differences in the types of radioactive sources influencing individual monitoring wells and by variations in hydrogeological conditions across the site. The following main types of contaminant sources can be distinguished:

radioactive waste trench storage sites (RWTS), contaminated surface water bodies, and contaminated soils. The highest levels of groundwater contamination by <sup>90</sup>Sr are observed in monitoring wells located within RWTS areas and in those influenced by seepage from contaminated water bodies (such as the former cooling pond and Lake Azbuchyn) (see Fig. 2b).

The conceptual model of radionuclide migration from trenches containing radioactive waste at RWTS sites is shown in Fig. 4a. During decontamination of the near zone of the ChNPP, trench areas were covered with a “clean” soil (sand) cap 0.5–1 m thick. In addition to the trenches themselves, residual “hot spots” of contaminated soil that were not completely



**Fig. 3.** Distribution of <sup>90</sup>Sr in groundwater in the ChNPP near zone in 2024 (yearly average values in wells; data of the SSE EcoCenter)



**Fig. 4.** Conceptual model of radionuclide migration to groundwater from trenches in RWTSS (a) and from contaminated water bodies into the Pripyat River (b)

removed during decontamination works (see Fig. 4a) may serve as additional sources of groundwater contamination in RWTSS sectors. Radionuclides are leached from the trenches and residual "hot spots" by precipitation and subsequently enter groundwater after migrating through soils of the vadose zone. Furthermore, some trenches may undergo temporary flooding by groundwater during wet seasons due to seasonal groundwater level fluctuations (Antropov et al., 2001). These mechanisms may create a complex "patchy" structure of groundwater contamination both laterally and vertically within the aquifer.

Water bodies located near the ChNPP – namely the cooling pond, river inlets, and floodplain lakes – experienced significant radioactive contamination during the accident. Over time, most radionuclide inventories in these water bodies have been redistributed from the water column to bottom sediments due to sorption and sedimentation processes.

The most contaminated water bodies in the near zone of the ChNPP include residual ponds within the former cooling pond basin and Lake Azbuchyn (see Fig. 1). Water levels in these water bodies are higher than the low-flow level of the Pripyat River, resulting in continuous head-driven seepage of contaminated water toward the river throughout the year.

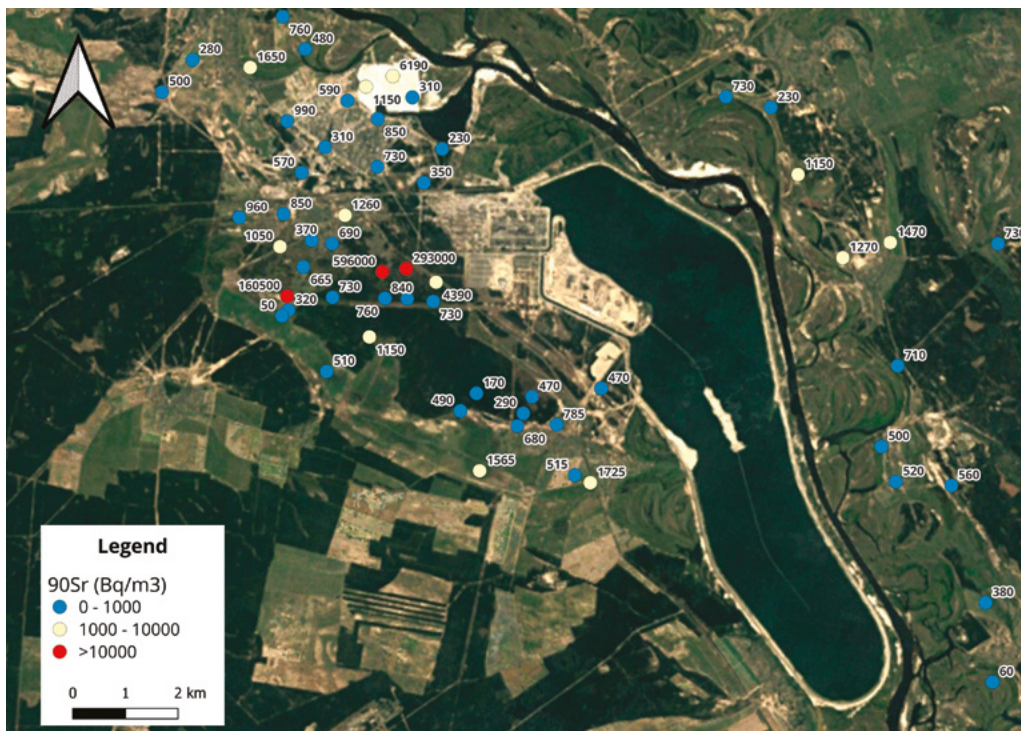
The conceptual model of radionuclide migration via groundwater pathways from contaminated water bodies into the Pripyat River is shown in Fig. 4b.

Due to water level differences of approximately 1–2 m between these floodplain water bodies and the Pripyat River, these areas are characterized by relatively high hydraulic gradients of groundwater flow. The floodplain sediments consist of highly permeable channel-facies quartz sands (hydraulic conductivity  $K = 12\text{--}15$  m/day) with low sorption capacity.  $^{90}\text{Sr}$  concentrations in seepage waters may increase when water passes through bottom sediments contaminated with fuel particles. A similar groundwater contamination mechanism was studied for the ChNPP cooling pond during its operation (IAEA, 2019).

These factors promote intensive migration of  $^{90}\text{Sr}$  in groundwater from contaminated water bodies, as confirmed by monitoring data from the SSE Ecocentre (see Fig. 2b, Fig. 3). These areas are characterized by the highest levels of groundwater contamination and therefore require particular attention in monitoring programs.

When the radionuclide source to groundwater is represented by contaminated surface soils, the unsaturated zone (vadose zone) acts as a protective barrier. Groundwater recharge within the Pripyat River terrace in the ChNPP near zone is estimated at  $200 \pm 50$  mm/year (Dzhepo, Skalsky, 2002; Bugai et al., 2012a).

Modeling of  $^{90}\text{Sr}$  migration through vadose-zone soils, accounting for retardation due to sorption, shows that even under minimal  $K_d$  values, a sandy vadose zone 4–5 m thick provides reliable



**Fig. 5.** Distribution of  $^{90}\text{Sr}$  in groundwater in the ChNPP near zone based on monitoring network of IGS (data for 1997) (IGS, 1998)

protection of groundwater against radioactive contamination throughout the period since the ChNPP accident. The presence of clay interlayers in the vadose zone further enhances groundwater protection. This conclusion is supported by monitoring observations at surface-contaminated sites, which show low levels of groundwater contamination (see Fig. 2b).

Thus, radioactive contamination of groundwater via radionuclide migration from surface soils may represent a risk primarily in areas with a shallow groundwater table and in zones of potential focused infiltration of precipitation or technogenic water discharges.

Concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  in groundwater in the vast majority of observation wells do not exceed  $100 \text{ Bq/m}^3$ , which is close to the analytical detection limit for this radionuclide in water samples (Fig. 2a). These concentrations are an order of magnitude lower than the DR-2006 drinking water standard. The mechanisms responsible for the presence of low levels of  $^{137}\text{Cs}$  in monitoring wells will be discussed in more detail in the next section.

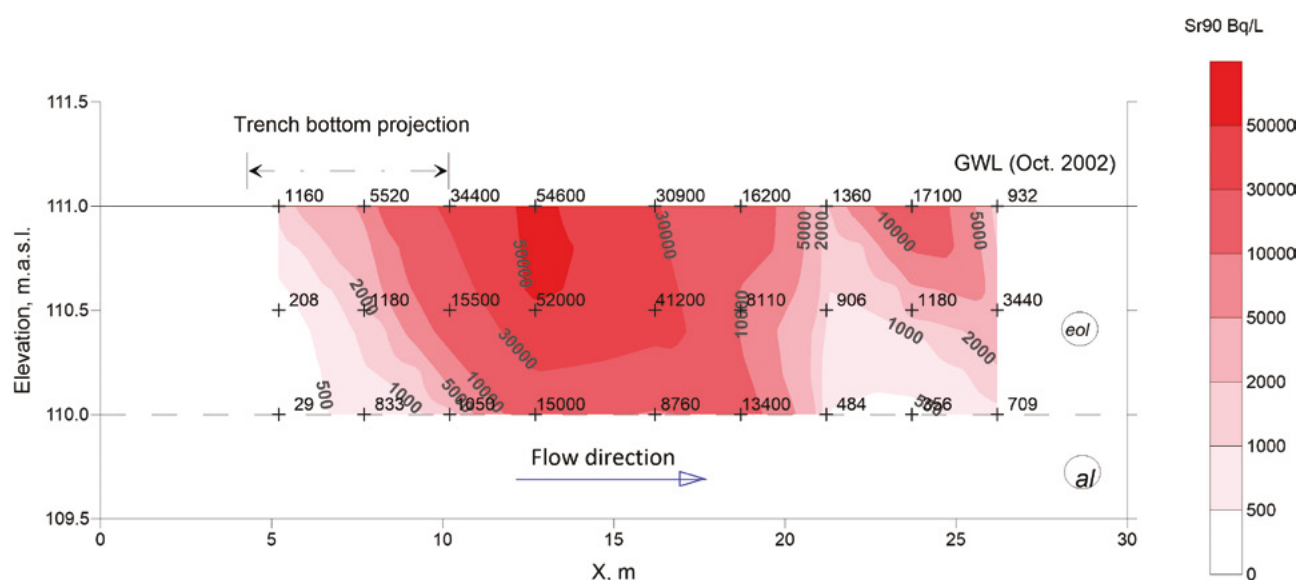
It should be noted that polygon field studies and groundwater surveys using small-diameter (1–2 inch) wells with short screens (0.5–1 m), as well as drill-auger sampling, often reported significantly higher  $^{90}\text{Sr}$  concentrations in groundwater compared with the data obtained from the monitoring network of the SSE EcoCenter. Reported

concentrations reached up to  $10^6$ – $10^7 \text{ Bq/m}^3$  (Antropov et al., 2001; Van Meir et al., 2009; Bugai et al., 2012a, 2020).

Data on the distribution of  $^{90}\text{Sr}$  in the unconfined aquifer based on the monitoring network installed by the Institute of Geological Sciences (IGS), which sampled the upper part of the unconfined aquifer in Quaternary deposits in 1997, are shown in Fig. 5. The observed groundwater contamination levels within the RWTSS sectors and in areas affected by topsoil contamination are an order of magnitude higher than those reported by the EcoCenter monitoring network and presented in Fig. 3.

Example of the distribution of  $^{90}\text{Sr}$  in groundwater downstream of trench No. 22 at the Red Forest site, based on sampling using the Waterloo Profiler push-drill system, is shown in Fig. 6. It reveals a high-activity  $^{90}\text{Sr}$  plume, with concentrations of up to  $5 \times 10^7 \text{ Bq/m}^3$ , that has migrated approximately 10 m downgradient from the trench.

The lower  $^{90}\text{Sr}$  groundwater contamination levels reported from EcoCenter monitoring wells can be explained by several factors. The long 12 m well screens and the absence of proper sealing promote vertical cross-flow along the casing between the upper, more contaminated, and lower parts of the unconfined aquifer. As a result, water samples collected from such wells represent depth-averaged groundwater over a broad screened interval.



**Fig. 6.**  $^{90}\text{Sr}$  distribution in groundwater downstream from trench no.22 at Red Forest RWTSS characterized using the Waterloo Profiler push-drill sampler in October 2002 (data of the IGS)

Another problem is that the placement of monitoring wells within the RWTSS sectors is not aligned with the actual locations of contamination sources. This is because, at the time of well construction, the exact positions of individual RAW trenches were not known. Detailed surveys of the RWTSS sectors and field mapping of the trenches were carried out later. At the same time,  $^{90}\text{Sr}$  plumes are confined to the immediate vicinity of the trenches (see Fig. 6).

### 3.3 Time trends of radioactive contaminants in groundwater

Cumulative time series of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in groundwater for the period 1989–2024, compiled for groups of monitoring wells influenced by different source types (RWTSS, water bodies, and topsoil contamination), are shown in Fig. 7.

The  $^{137}\text{Cs}$  concentrations exhibit declining trends over the observation period for all subsets of monitoring wells. The measured values, except for few outliers, remain below the DR-2006 drinking water standard.

The  $^{90}\text{Sr}$  concentrations show an initially increasing trend during 1989–1995, followed by a period of relatively stable concentrations in 1995–2015, and then gradually decreasing trend over the last decade. In many wells  $^{90}\text{Sr}$  concentrations still remain orders of magnitude above the DR-2006 drinking water standard.

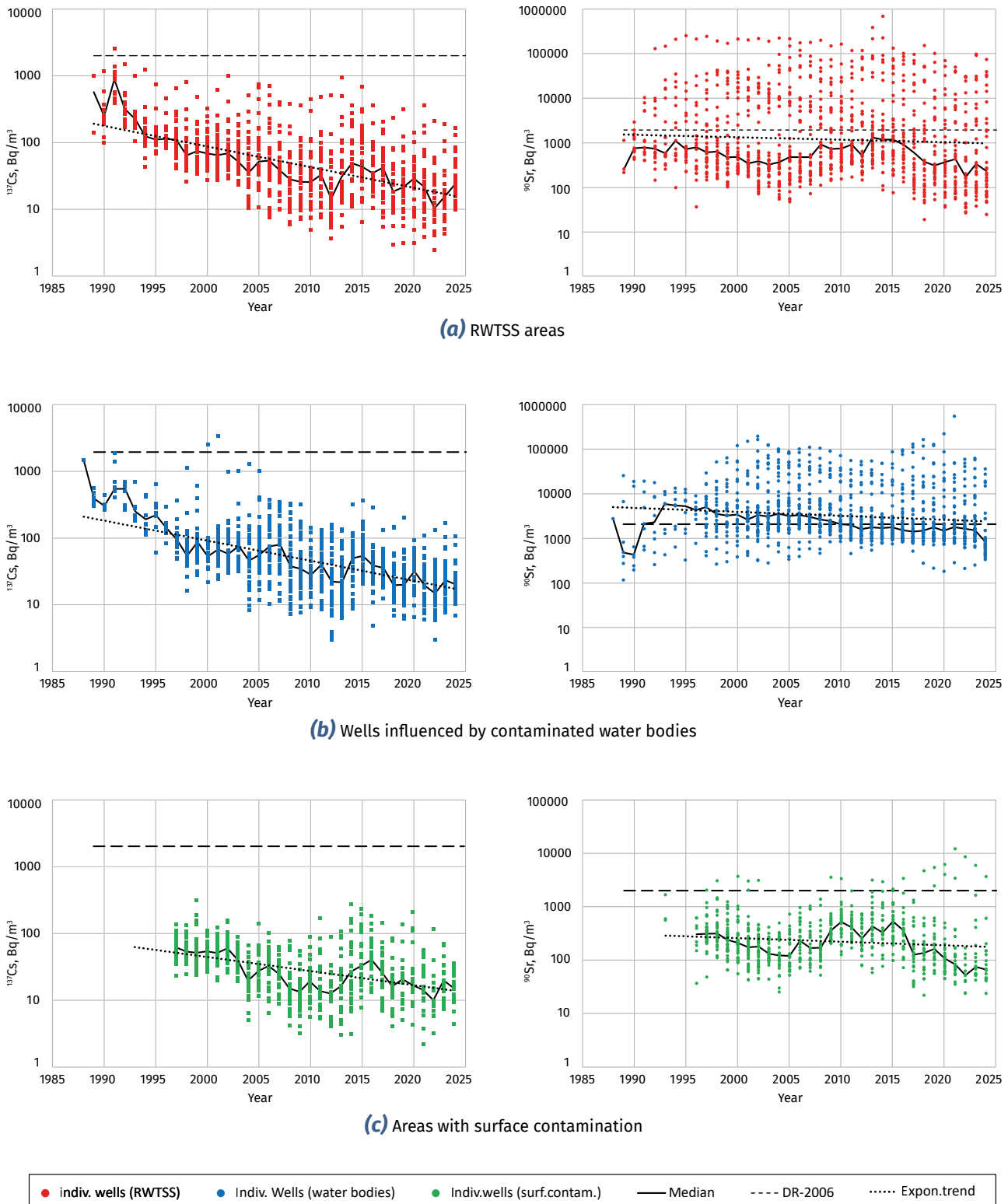
These long-term  $^{90}\text{Sr}$  trends are generally consistent with the conceptual model assuming release of  $^{90}\text{Sr}$  from the radioactive source-term, namely

micron-sized nuclear fuel particles, followed by migration through the vadose zone towards groundwater system (Kashparov et al., 2019).

The decreasing trends of  $^{137}\text{Cs}$  can be explained by contamination of monitoring wells with radioactive topsoil material introduced during drilling. This hypothesis is supported by the fact that  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in groundwater do not show substantial variation among different source types (Fig. 8a) or between the upper and lower parts of the unconfined aquifer (Fig. 8b).

This interpretation is further supported by data of Dzhepo (Dzhepo et al., 1997), who reported the presence of low-mobility refractory radionuclides such as  $^{95}\text{Zr}$  and  $^{144}\text{Ce}$ , associated with nuclear fuel matrix, in groundwater samples collected in 1987 from monitoring wells installed at the cooling pond site. This observation indicates contamination introduced from the topsoil rather than true dissolved-phase transport in groundwater.

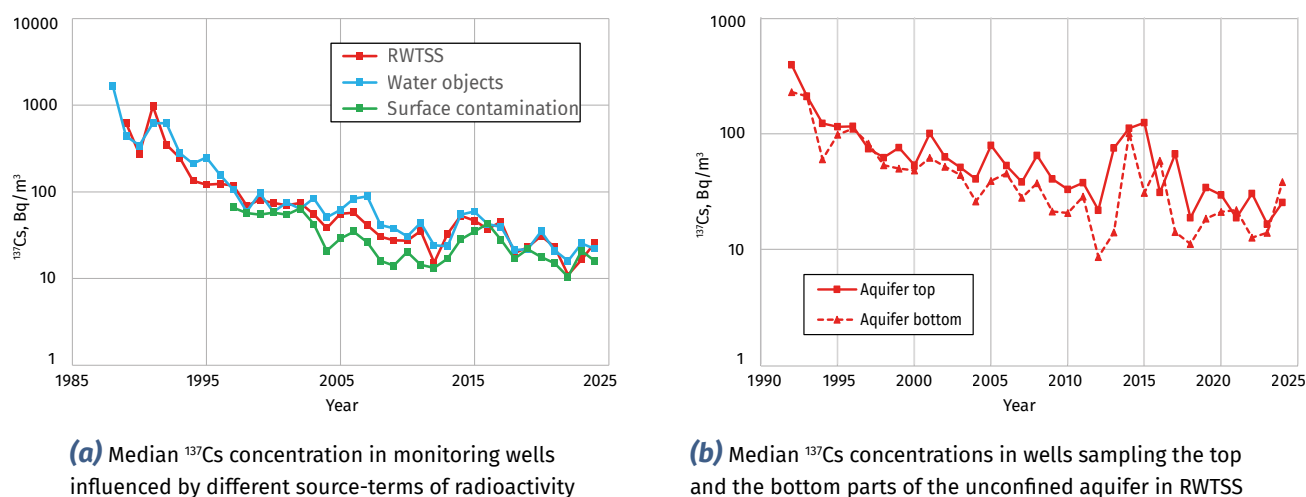
To examine radionuclide behaviour in individual monitoring wells of the SSE Ecocenter, trend analysis was carried out using the Mann–Kendall (MK) method (Aziz et al., 2003). The MK test assumes independence of observations and a monotonic trend. In this study, groundwater monitoring data were aggregated to annual values to reduce short-term variability and potential serial correlation. Given the slow response of the groundwater system and the long-term nature of the observed trends, these assumptions are considered acceptable for the purposes of the analysis. Prior to averaging, outliers were filtered from



**Fig. 6.**  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  concentrations in monitoring wells influenced by various types of sources of radioactivity (data of the SSE Ecocenter)

the observation series using the z-score method ( $2\sigma$  criterion). The analysis covered the last 10 years (2015–2024). The analyses were performed using the pyMannKendall Python library (<https://pypi.org/project/pymannkendall/>). Data from all 154 monitoring wells operated by the SSE

Ecocenter in the near zone of the ChNPP were analysed. The results of the analyses are presented in Table. Earlier, similar analyses had been carried out for a smaller subset of representative wells (74 wells) covering the period 2010–2019 (Bugai et al., 2022).



**Fig. 8.** Comparison of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in monitoring wells across contamination sources and aquifer depths (upper vs. lower unconfined aquifer)

**Table.** Summary results of Mann-Kendall trend analysis of radionuclide concentrations in groundwater monitoring wells in Chernobyl zone (2015–2024)

Site	$^{137}\text{Cs}$			$^{90}\text{Sr}$		
	No trend	Increase	Decrease	No trend	Increase	Decrease
RWTSS areas	31	–	8	21	1	17
RWDS Pidlisnyi	9	1	3	9	–	4
RWDS 3rd Stage of ChNPP	5	–	1	2	–	4
RWDS Buryakivka	8	–	1	9	–	–
Pripyat City and its environs (area with surface contamination)	10	–	5	8	–	7
Kopachi and Chistogalivka (area with surface contamination)	7	–	3	6	–	4
Cooling pond	43	–	5	38	1	9
Azbuchyn Lake	5	1	–	6	–	–
Left bank of Pripyat River	4	–	4	4	–	4
<b>TOTAL</b>	<b>122</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>103</b>	<b>2</b>	<b>49</b>

Only two wells for  $^{137}\text{Cs}$  and two wells for  $^{90}\text{Sr}$  out of 154 (<2%) show statistically significant increasing concentration trends. For  $^{137}\text{Cs}$ , 30 wells (20%) show decreasing concentrations, while 122 wells do not show a clear trend (e.g., concentrations fluctuate around a stable level and/or measurement uncertainty is large).

For  $^{90}\text{Sr}$ , 49 wells (32%) show decreasing trends, while for 103 wells no clear trend is observed.

Compared with the results for 2010–2019, the proportion of wells with increasing trends during the last decade has decreased: for  $^{137}\text{Cs}$  from 10% to 2%,

and for  $^{90}\text{Sr}$  from 7% to 2%. Overall, decreasing or relatively stable radionuclide concentrations dominate.

### 3.4 Overview of groundwater modelling studies

Considering the status of the CEZ, post-accident studies on forecasting the migration of radioactive contaminants in groundwater were mainly aimed at assessing the risks of radionuclide transport by groundwater to the Prypiat River, as well as the risks of contamination of the second-from-surface

confined aquifer within Eocene deposits, which is used for water supply at the ChNPP.

Screening assessments of  $^{90}\text{Sr}$  migration from contaminated soils in Exclusion Zone catchments were carried out in (Bugai et al., 1996a). Modeling studies of radionuclide migration from RWTSS facilities are presented in (Il'ichev, Akhunov, 1992; Consortium..., 1995; Mishunina et al., 1995; Bugai et al., 1996a, 2012a; Molitor et al., 2017). These studies demonstrated that groundwater migration of  $^{90}\text{Sr}$  and other radionuclides from Chernobyl fallout does not have the potential to cause unacceptable contamination levels in the Prypiat River that could pose risks to populations outside the CEZ. Similar conclusions were drawn from modelling radionuclide migration in groundwater from the Shelter Object (Kiva et al., 1996; Shestopalov et al., 2002).

Numerical modelling of  $^{90}\text{Sr}$  groundwater transport toward the Yaniv well field, which exploits the confined aquifer in Eocene deposits (Bugai et al., 1996b; Smith, Gaganis, 1998), showed that this aquifer is well protected from surface contamination sources by geological barriers, and that the risks of exceeding drinking-water standards are very low.

A key factor ensuring low risks of radionuclide transport in groundwater beyond the CEZ is radioactive decay during the retarded migration of radionuclides caused by sorption on geological deposits, which delays their movement from contamination sources to receptors. Radionuclide concentrations in groundwater are further reduced due to dilution (mixing) in discharge zones (e.g., abstraction wells or rivers), where only a relatively small fraction of inflow is represented by relatively “young” waters that may contain radionuclides. An additional dilution effect in surface waters occurs through mixing of groundwater discharge with “clean” river waters from uncontaminated parts of the catchment upstream (Bugai et al., 2022).

### 3.5 Strategy for managing contaminated groundwater

The radionuclide transport forecasts discussed above, together with the declining trends of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in surface water and groundwater of the CEZ, support the strategy of Monitored Natural Attenuation (MNA) for managing contaminated groundwater (Bugai et al., 2022).

MNA is a remediation strategy in which naturally occurring physical, chemical, and biological processes are relied upon to reduce the concentration, mobility, or volume of contaminants in

groundwater to acceptable levels while the site is carefully monitored. Under the MNA approach, no active engineered remediation measures are implemented; instead, a monitoring program is established to demonstrate that attenuation processes are occurring and that contaminant plumes remain stable or are shrinking, ensuring that risks to receptors (such as drinking water sources or surface waters) remain within acceptable limits (Azadpour-Keeley et al., 2001; IAEA, 2006b; US EPA, 2007; Devlin et al., 2025).

The natural attenuation processes responsible for declining groundwater concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  in the CEZ include (Bugai et al., 2012a, b):

- gradual depletion of the  $^{90}\text{Sr}$  source in the form of fuel particles in soils due to dissolution of uranium oxide matrix and subsequent leaching;
- geochemical evolution of groundwater downstream of waste trenches in RWTSS caused by maturation of buried organic materials, leading to decreased concentrations of cations competing with  $^{90}\text{Sr}$  for sorption sites on soil;
- retardation of radionuclides in near-surface soil due to sorption process; and
- involvement of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  (biochemical analogues of Ca and K) in the biological cycle within vegetation.

Recent safety assessment analyses by Molitor (Molitor et al., 2017) indicate that source control measures in the CEZ, such as excavation and re-disposal of radioactive waste trench sites (RWTSS) – which represent major sources of groundwater contamination – are not justified. This is due to their high cost, the very large volumes of secondary waste generated requiring management, and the negligible (or absent) radiological benefit.

This conclusion is consistent with recent analyses of the challenges associated with large-scale remedial activities in areas of Japan affected by the Fukushima accident, where the management of enormous volumes of remediation waste became a major environmental, technical, and social issue (IAEA, 2023).

The conceptual framework adopted by the SSE EcoCenter for managing contaminated water resources in the CEZ considers MNA to be an appropriate approach for contaminated groundwater in the CEZ (SSE..., 2019).

An essential condition for implementing the MNA strategy is reliable groundwater monitoring aimed at controlling radionuclide migration processes, refining models, and ensuring an adaptive response to potential changes in the situation (US EPA, 2007).

In view of the shortcomings of the monitoring network of the SSE EcoCenter discussed above, modernization and improvement of groundwater monitoring in the CEZ are of vital importance.

#### 4. Priorities for modernizing groundwater monitoring in the Chernobyl zone

To define priorities for improving the groundwater monitoring program in the CEZ, it is important to identify the objectives of this program in a comprehensive way.

##### 4.1 Objectives of monitoring program

The monitoring objectives are defined by the Statute and activities of SSE EcoCentre (SSE..., 2021). The radiation monitoring system should provide information on the following key groundwater indicators:

- contamination of groundwater in the CEZ by Chernobyl-derived radionuclides and radioactive pollutants that may originate from radioactive waste storage sites of the Vector complex;
- groundwater level regime in aquifers, which makes it possible to assess conditions for potential flooding of radiation-hazardous sites, as well as the directions and velocities of contaminant transport via groundwater toward potential receptors.

Groundwater radiation monitoring data in the CEZ should serve the following main purposes:

- ensuring compliance with regulatory licensing requirements for the monitoring of radioactive waste storage and disposal sites;
- planning and implementing measures to protect the Pripyat River and its tributaries from radioactive contamination;
- providing data for predicting and assessing radiological impacts of contaminated water resources on human health and the environment;
- assessing the dynamics of natural attenuation processes in groundwater and surface water.

For licensed radioactive waste disposal sites in the CEZ, such as the RWDS Buryakivka and the Vector complex, the groundwater monitoring program is a key element in verifying that the facility complies with established operational and safety requirements, particularly with regard to impacts on the environment and the public (IAEA, 2014). The General Safety Provisions for Radioactive Waste Disposal (SNRIU Order No. 331 of 13 August 2018) re-

quire the development and implementation of an environmental monitoring program, which must include groundwater monitoring in accordance with a program approved by the regulator and justified in the Safety Analysis Report (SAR). The requirements for the structure and content of the SAR for surface and near-surface radioactive waste disposal facilities (SNRIU Order No. 520 of 2 December 2019) explicitly state that the SAR must include a description of the site's hydrogeological conditions, predictions of radionuclide transport in aquifers, and the groundwater monitoring program, including the well network, monitored parameters, sampling frequency, and measurement methods.

With regard to supporting the MNA strategy for nuclear legacy facilities, the monitoring system should serve the following purposes (US DOE, 2012):

- Demonstrate that natural attenuation processes in groundwater occur as predicted.
- Detect changes in hydrogeological or geochemical conditions that could reduce attenuation effectiveness.
- Confirm that contamination plumes remain stable and do not expand downgradient, laterally, or vertically.
- Verify that no unacceptable impacts occur at potential receptors, such as surface water bodies or deeper aquifers, and identify possible new contamination sources.

##### 4.2 Directions for modernization of groundwater monitoring system

The analysis presented above has revealed several critical problems and shortcomings of the current groundwater monitoring network in the CEZ. These include the outdated design of monitoring wells, inappropriate placement of wells with respect to contamination sources, and an insufficient or even absent monitoring network at some key locations, for example in the vicinity of the Buriakivka RWDF and the Vector Complex. As discussed earlier, monitoring data also indicate a high probability of well contamination during drilling in the 1990s, which distorts monitoring results; this issue is particularly evident for the relatively immobile radionuclide <sup>137</sup>Cs detected in some wells.

The conceptual approach to the improvement and modernization of groundwater monitoring in the CEZ was recently addressed in the technical assistance project to Ukraine implemented under the European Union Instrument for Nuclear Safety Cooperation (INSC) programme, "Design of a Comprehensive Water

Monitoring System for the Chernobyl Exclusion Zone” (Bugai, Hrygorenko, 2025). The main directions for modernization of the monitoring system are largely based on earlier studies and recommendations of the IGS (Dzhepo et al., 1997; Dzhepo, Skalsky, 2002) and are briefly outlined below.

The proposed approach is based on the following key provisions:

- Extension and optimization of the groundwater monitoring network through the introduction of modern designs of observation wells.
- Introduction of modern and reliable groundwater sampling methods.
- Optimization of the monitoring program (sampling frequency, types of analyses) and expansion of the list of measured parameters, including basic geochemical indicator parameters (pH, *Eh*, electrical conductivity, and major-ion composition).
- Implementation of automated monitoring equipment (in particular, water-level sensors with data loggers).
- Development of an effective information system (database) for storing and analysing monitoring data.
- Strict adherence to field and laboratory QA/QC procedures.

The key provisions of the above list are briefly described below.

#### 4.2.1 Monitoring well design

It is essential to replace outdated wells constructed in 1989–1991 with iron casings and long 12 m screens lacking proper annular seals, with wells or multi-level well clusters designed according to modern standards (PVC casing, 2–3 m screens, proper sealing of the screened interval and wellhead) (ISO, 2009; Brown et al., 2014; ASTM..., 2024). Appropriate precautions should also be taken during installation, such as careful removal of contaminated topsoil before drilling, to prevent radioactive contamination of the borehole.

#### 4.2.2 Monitoring network extension and optimization

The proposed approach to improving the groundwater monitoring system provides for the integration of monitoring networks at different spatial levels (scales) – from the object/site level (e.g., a specific RWDF or RWTSS sector) to the regional level.

A typical object-level monitoring network includes:

- an upstream well to characterize background aquifer conditions;
- wells located in “target zones” within the aquifer affected (or potentially affected) by contaminant transport from a radiation-hazardous site.

In RWTSS sectors, wells that allow tracking the impact on groundwater from selected individual waste burials (representative and/or higher-risk ones) should also be installed.

The CEZ is characterized by a large number of radiation-hazardous sites. Therefore, a graded (risk-based) approach (IAEA, 2014) should be applied when defining priorities for the development and modernization of the CEZ groundwater monitoring system. This prioritization should consider:

- presence of aquifer contamination;
- inventory of radionuclide activity at the transport source and radionuclide mobility;
- availability and condition of engineered barriers;
- unfavourable hydrogeological and/or geochemical conditions (e.g., shallow groundwater depth, potential flooding, proximity to surface water bodies).

An important aspect is the improvement of the monitoring network in the area of the Buryakivka RWDS and the Vector complex (see Fig. 1) to allow reliable determination of regional groundwater flow directions toward discharge zones (surface watercourses).

For sites where a detailed network of observation wells is currently absent and the spatial distribution of the contamination plume is undefined (e.g., certain RWTSS sectors), an adaptive monitoring approach should be followed. At the initial screening stage, the proposed minimum network includes one upstream (background) well and one downstream well from the contamination source within the expected target zone, assuming that the groundwater flow direction is known or can be estimated from a groundwater flow model.

#### 4.2.3 Sampling methods and QA/QC

Alongside well construction, the methodology of groundwater sampling using appropriate specialized equipment is a critical component of groundwater monitoring.

It is recommended to introduce into monitoring practice in the CEZ standardized sampling protocols that comply with modern international standards (ASTM..., 2019a, 2023; ISO, 2009, 2021). The application of such protocols enables repeated measurements while maintaining the accuracy and reproducibility of results, which is essential both for long-term trend analysis and for the comparability of monitoring data obtained by different institutions.

An important requirement for obtaining representative groundwater samples is well purging prior to sampling in order to remove stagnant water from the well. The renewal of groundwater during purging should be controlled through online monitoring of indicator parameters, such as groundwater pH, electrical conductivity, and temperature. It is also recommended that groundwater samples be filtered at the time of collection through a 0.45 µm filter to remove suspended material. Suspended particles can contain a significant fraction of radionuclides, particularly  $^{137}\text{Cs}$ , and may therefore bias the interpretation of dissolved radionuclide concentrations in groundwater in samples (Fujikawa et al., 2025).

A critically important aspect is the improvement of QA/QC procedures at all stages of monitoring activities in the CEZ, in accordance with the requirements of relevant national and international standards (DSTU..., 2007; ISO, 2014; ASTM..., 2018, 2019b). These procedures should cover:

- Field operations related to well purging and groundwater sample collection.
- Sample filtration and preservation (stabilization).
- Documentation of sampling conditions.
- Transfer and handling of samples during transportation to the laboratory.
- Analytical measurements in the laboratory.
- Entry of analytical results into the monitoring database.

#### **4.2.4 Optimization of monitoring program (sampling frequency and analytical scope)**

The observation frequency of once per month for groundwater radiological parameters, which is currently applied to some monitoring wells in the CEZ, is in most cases not justified. Groundwater represents a relatively conservative environment, where changes in hydrochemical conditions generally occur slowly. Exceptions may occur in specific situations, such as areas with shallow groundwater tables or aquifers hydraulically connected to surface water bodies, where rapid fluctuations in surface-water levels may influence groundwater conditions.

Moreover, radionuclides typically exhibit very slow migration rates in geological media due to sorption onto the soil and sediment matrix. In addition, frequent purging of wells during sampling may disturb natural hydrogeological conditions in the aquifer.

Based on international experience (European...2009) and the analysis of long-term trends in radioactive contamination of groundwater in the CEZ presented earlier, the following indicative monitoring frequencies for radiological parameters are recommended:

- Wells exhibiting increasing trends of radioactive contamination – once per quarter.
- Wells with stable or decreasing trends but with concentrations exceeding drinking water standards for  $^{90}\text{Sr}$  and/or  $^{137}\text{Cs}$  – twice per year.
- Wells with consistently low concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  and/or  $^{137}\text{Cs}$  and non-increasing trends (not exceeding the DR-2006 standard) – once per year.
- Newly constructed wells at priority (high risk) sites – once per quarter during the first year of monitoring; at other sites – twice per year, in order to establish initial trends in groundwater contamination.

In addition to monitoring radioactive constituents, it is advisable during the modernization stage to include key hydrochemical parameters in the monitoring program. These parameters help characterize hydrogeological conditions and influence radionuclide transport processes in groundwater. Such parameters may include pH, redox conditions ( $E_h$ ), electrical conductivity, and major-ion composition.

#### **4.2.5 Update and revision of national standards**

In Ukraine, methodological aspects of groundwater monitoring are regulated by the normative documents DSTU ISO 5667-18:2007 (DSTU..., 2007) and SOU-N MEV 40.1-00013741-79:2012 (SOU-N..., 2012). These regulatory documents are partly outdated (for example, with regard to requirements for the design of monitoring wells and other aspects), do not take into account modern technologies, and contain significant gaps concerning important aspects of groundwater monitoring discussed above.

Accordingly, there is a need to develop a national methodological guidance document (guideline/standard) covering key aspects of monitoring radioactive contamination of groundwater at the most important nuclear-legacy facilities, in particular in the Chernobyl Exclusion Zone. Such a regulatory document would also be useful for the development of groundwater monitoring systems at other radiologically hazardous sites in Ukraine, including the Prydniprovskiy Chemical Plant uranium legacy site, nuclear power plant sites, and regional specialized radioactive waste storage facilities of the State Corporation “Radon”.

## 5. Conclusions

The analysis of groundwater monitoring data and modelling studies shows that  $^{90}\text{Sr}$  remains the principal radionuclide of concern in groundwater in the Chernobyl Exclusion Zone, whereas concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  and transuranic radionuclides are generally low. Long-term monitoring records covering more than three decades indicate that radionuclide concentrations in groundwater are predominantly stable or declining, particularly during the last decade. These trends suggest a gradual reduction of radionuclide inputs to groundwater and support the conceptual understanding of radionuclide migration processes in the CEZ.

The observed behaviour of radionuclides is consistent with the combined effects of source depletion, sorption-driven retardation in geological media, radioactive decay, and dilution in groundwater discharge zones. Together with earlier modelling studies, these findings indicate that large-scale migration of radionuclides via groundwater pathways beyond the CEZ poses relatively low risks to external receptors, including the Pripjat River system.

Under these conditions, Monitored Natural Attenuation appears to be an appropriate strategy for managing contaminated groundwater in the CEZ. However, the successful implementation of this approach requires a reliable and scientifically justified groundwater monitoring system capable of confirming the stability or decline of contaminant plumes and detecting possible changes in hydrogeological conditions.

The present analysis highlights several limitations of the existing groundwater monitoring network, including outdated well designs, insufficient spatial coverage in some areas, and methodological issues related to sampling and QA/QC procedures. Modernization of the monitoring system is therefore necessary and should include improved well design, optimization of monitoring networks, standardized sampling protocols, enhanced QA/QC procedures, and improved data management systems.

An important contribution to the understanding of groundwater contamination processes in the CEZ has been provided by experimental

polygon-type field studies, which revealed detailed plume structures and radionuclide concentrations that are not fully captured by the routine monitoring network. The continuation of such targeted research investigations is essential for improving conceptual models and validating predictions of radionuclide migration.

Following the modernization of the groundwater monitoring system and the accumulation of improved monitoring data, it will be necessary to re-evaluate the current MNA-based management strategy and refine predictive models of radionuclide transport. Such an adaptive approach will ensure that groundwater management in the CEZ remains scientifically justified and responsive to new monitoring information.

It should be noted that the analyses presented in this study constitute an initial stage of interpretation of the extensive groundwater monitoring dataset accumulated in the CEZ. While the current work is based on relatively simple and robust statistical approaches, the dataset itself is well suited for the application of more advanced methods, such as generalized additive models, change-point detection, spatio-temporal statistical modelling, and machine learning techniques. The implementation of such approaches is expected to yield additional insights into the dynamics and controlling factors of radionuclide migration and will be pursued in future studies.

**Acknowledgements.** *This article was prepared within the framework of the research program of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, research theme III-11-24: “Combined approaches based on machine learning methods and physics-based models for the analysis of monitoring data and prediction of geo-migration processes”.*

*The author thanks SSE Ecocenter and Mr. Sergey Kireev for providing access to the groundwater monitoring database within the framework of Cooperation protocol between SSE Ecocenter and the Institute of Geological Sciences. The author also thanks Bogdan Zanoz for assistance with preparation of computer graphics and Olesya Kvita for support with statistical analyses.*

Радіоактивне забруднення підземних вод у Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ) з перших місяців після аварії на ЧАЕС (травень – квітень 1986 р.), коли були реалізовані масштабні водозахисні заходи, розглядається як важливий шлях перенесення радіоактивності до річкової мережі басейну Прип'яті–Дніпра. У даній роботі узагальнено результати довгострокового моніторингу та наукових досліджень радіоактивного забруднення підземних вод у ЧЗВ з особливою увагою до просторових закономірностей, часових тенденцій та їх значення для вдосконалення системи моніторингу та стратегій поводження із забрудненими підземними водами.

Аналіз даних моніторингу за період 1989–2024 рр. разом з даними моделювання, огляд яких наведений у статті, показує, що  $^{90}\text{Sr}$  є основним радіонуклідом, який визначає радіологічні ризики від забруднення підземних вод, причому його концентрації локально досягають  $10^5$ – $10^6$  Бк  $\text{м}^{-3}$  у районах впливу пунктів захоронення радіоактивних відходів (РАВ) і забруднених водойм. Натомість концентрації  $^{137}\text{Cs}$  у підземних водах, як правило, є зазвичай нижчими за  $100$  Бк  $\text{м}^{-3}$  і значно меншими за норматив для питної води. Довгострокові тенденції свідчать про загальну стабілізацію та поступове зниження концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  у більшості спостережних свердловин протягом останнього десятиліття, що відображає виснаження джерела забруднення та прояв процесів природного самоочищення у підземних водах.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування стратегії моніторингу процесів природного самоочищення (Monitored Natural Attenuation – MNA) для поводження із забрудненими підземними водами за умови, що система моніторингу забезпечує надійне підтвердження стабільності ореолів забруднених підземних вод і низьких ризиків для потенційних рецепторів, включаючи р. Прип'ять. Водночас існуюча система моніторингу підземних вод у ЧЗВ має низку обмежень, пов'язаних із конструкцією спостережних свердловин, просторовим покриттям мережі та методами відбору проб. Результати детальних полігонних досліджень свідчать, що на певних гідрогеологічних ділянках можуть формуватися значно вищі концентрації радіонуклідів, які не завжди належним чином фіксуються існуючою мережею моніторингу.

Розглянуто пріоритети модернізації системи моніторингу підземних вод у ЧЗВ, зокрема щодо системного визначення цілей моніторингу, удосконалення конструкції спостережних свердловин і методів відбору проб, інтеграції геохімічних і радіологічних спостережень, а також розроблення оновлених методичних рекомендацій. Модернізація системи моніторингу дозволить забезпечити більш надійну оцінку міграції забруднювачів і створить науково обґрунтовану основу для довгострокового управління радіоактивним забрудненням підземних вод у ЧЗВ.

## References

- Antropov V.M., Bugai D., Dutton L.M.C., Gerchikov M., Kennett E.J., Ledenev A.I., Novikov A.A., Rudko V., Ziegenhagen J. 2001. Review and analysis of solid long-lived and high level radioactive waste arising at the Chernobyl Nuclear Power Plant and the restricted zone, EUR 198197 EN. NNC Ltd, Manchester. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31635.17442/1>
- ASTM International. 2018. Standard Guide for Sample Chain-of-Custody Procedures. ASTM D4840-99e1. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International.
- ASTM International. 2019a. Standard Guide for Sampling Ground-Water Monitoring Wells. ASTM D4448-01. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International.
- ASTM International. 2019b. Standard Guide for Documenting a Groundwater Sampling Event. ASTM D6089-19. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International.
- ASTM International. 2023. Standard Guide for Purging Methods for Wells Used for Ground Water Quality Investigations. ASTM D6452-18. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International.
- ASTM International. 2024. Standard Practice for Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells. ASTM D5092/D5092M-16. West Conshohocken, PA: ASTM International
- Azadpour-Keeley A., Keeley J.W., Russell H.H., Sewell, G.W. 2001. Monitored Natural Attenuation of Contaminants in the Subsurface: Processes. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 21, 97–107. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2001.tb00305.x>
- Aziz J.J., Ling M., Rifai H.S., Newell C.J., & Gonzales J.R. 2003. MAROS: A Decision Support System for Optimizing Monitoring Plans. *Ground Water*, 41 (3), 355–367. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02605.x>
- Bondarkov M., Oskolkov B., Gashchak S., Kireev S., Maksimenko A., Proskura N., Jannik G., Farfān E. 2011. Environmental radiation monitoring in the Chernobyl Exclusion Zone-history and results 25 years after. *Health Phys.*, 101 (4), 442–485. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e318229df28>
- Boychenko S., Kuchma T., Karamushka V., Maidanovych N., Kozak O. 2025. Wildfires and Climate Change in the Ukrainian Polissia During 2001–2023. *Sustainability*, 17, 2223. <https://doi.org/10.3390/su17052223>
- Beresford N.A., Fesenko S., Konoplev A., Skuterud L., Smith J.T., Voigt G. 2016. Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt? *J. Env Radioactivity*, 157, 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.003>
- Brown E.G. Jr., Rodriguez M., Barcellona Ingenito M. 2014. Well Design and Construction for Monitoring Groundwater at Contaminated Sites. California Department of Toxic Substances Control, California Environmental Protection Agency.
- Bugai D.A., Waters R.D., Dzhepo S.P., Skalsky A.S. 1996a. Risks from radionuclide migration to groundwater in the Chernobyl 30-km zone. *Health Phys.*, 71, 9–18. <https://doi.org/10.1097/00004032-199607000-00002>
- Bugai D.A., Smith L., Beckie R. 1996b. Risk-Cost Analysis of Strontium-90 Migration to Water Wells at Chernobyl Nuclear Power Plant. *Environ. & Engin. Geosci.*, 2 (2), 151–164. <https://doi.org/10.2113/gseengeosci.II.2.151>
- Bugai D., Skalsky A., Dzhepo S., Kubko Yu., Kashparov V., Van Meir N., Stammose D., Simonucci C., Martin-Garin A. 2012a. Radionuclide migration at experimental polygon at Red Forest waste site in Chernobyl zone. Part 2: Hydrogeological characterization and groundwater transport modeling. *Applied Geochemistry (Special Issue: Chernobyl)*, 27 (7), 1359–1374. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.028>
- Bugai D., Tkachenko E., Van Meir N., Simonucci C., Martin-Garin A., Roux C., Le Gal La Salle C., Kubko U. 2012b. Geochemical influence of waste trench no.22T at Chernobyl Pilot Site at the aquifer: Long-term trends, governing processes, and implications for radionuclide migration. *Applied Geochemistry (Special Issue: Chernobyl)*, 27, 1320–1338. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.021>
- Bugai D., Bayer P., Haneke K., Sizov A., Tretyak O., Kubko Yu., Kireev S., Molitor N. 2020. Radioactive contamination of groundwater at waste dump sites in Chernobyl Exclusion Zone. *Geologičnij žurnal*, 2 (371), 27–38. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.1.196974>

- Bugai D., Kireev S., Hoque M.A., Kubko Y., Smith J. 2022. Natural attenuation processes control groundwater contamination in the Chernobyl exclusion zone: evidence from 35 years of radiological monitoring. *Scientific Reports*, 12 (1), 18215. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22842-5>
- Bugai D., Hryhorenko D. 2025. Modernization of groundwater monitoring system in the chornobyl exclusion zone: challenges and implementation of international standards. *Proceedings of the XXV International Science Conference "Ecology. Human. Society" dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN*, June 12, 2025, Kyiv, Ukraine. Kyiv, pp. 104–108. <https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331224>
- Consortium WMC. 1995. Management of radioactive waste in dumps in the Chernobyl exclusion area (TACIS UR/029). Summary report on Work Group 1. Assessment of arising, their emplacement and risk. Con-sortium Waste Management Chernobyl (TACIS UR/029). K.A.B., Document no. 1000/BM/05.0003/01, 1995.
- Devlin J.F., Rhoades A.J.H., Heintz M.B. 2025. Advances in Monitored Natural Attenuation—New Methods Building on a Strong Foundation. *Groundwater Monit R*, 45. 3–4. <https://doi.org/10.1111/gwmr.70023>
- DSTU ISO 5667-18:2007.. Water quality. Sampling. Part 18. Guidance on sampling of groundwater at contaminated sites (ISO 5667-18:2001, IDT). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy 2007. (in Ukrainian).
- Dzhepo S.P., Skalskyi A.S., and Bugai D.A. 1997. Development of methods for the organization and implementation of groundwater monitoring in the Exclusion Zone in the years following the accident. In: *Radio-Geoecology of Water Bodies in the Area Affected by the Chernobyl NPP Accident, vol. 1. Monitoring of Radioactive Contamination of Natural Waters of Ukraine*. (Ed. O.V. Voitsekhovich). Kyiv: Chernobylinterinform, pp. 152–161 (in Russian).
- Dzhepo S., Skalskyi A. 2002. Radioactive contamination of groundwater within the Chernobyl exclusion zone. In: Shestopalov V. (Ed.), *Chernobyl Disaster and Groundwater*. A.A. Balkema Publishers, pp. 25–70.
- European Commission. 2009. WFD CIS Technical Report No. 18. 2009. Guidance on groundwater status and trend assessment, Directorate-General for Environment, European Commission. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/77587>
- Freed R., Smith L., Bugai D. 2004. The effective source area of <sup>90</sup>Sr for a stream near Chernobyl, Ukraine. *J. Contam. Hydrol.*, 71 (1–4), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2003.07.002>
- Fujikawa Y., Bugai D., Kokubun K., Avila R., Lewtas P., Taniguchi S., Laptev G., Kireev S., Panasiuk M., Shekhunova S. 2024. Characterization and Re-Evaluation of <sup>137</sup>Cs in Groundwater from Monitoring Wells in the 10-Km Zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4888279>
- IAEA. 1999. Technical options for the remediation of contaminated groundwater. TECDOC-1088. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA. 2004. Surveillance and monitoring of near surface disposal facilities for radioactive waste. SRS no. 35. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA. 2006a. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA. 2006b. Applicability of monitored natural attenuation at radioactively contaminated sites. Technical Report Series no. 445, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA. 2014. Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. IAEA Safety Standards Series No. SSG-31. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. 2019. Environmental Impact assessment of the drawdown of the Chernobyl NPP cooling pond as a basis for its decommissioning and remediation. IAEA-TECDOC-1886. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA. 2023. 10 years of Remediation Efforts in Japan Outcomes from the 4 IAEA – MOE Expert Meetings on Environmental Recovery of offsite areas affected by the Fukushima Daiichi Accident. IAEA-TECDOC-2020. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IGS. 1998. Operational and predictive assessment of radiohydrogeological conditions in the Exclusion Zone and development of recommendations for improvement of groundwater monitoring. Research report under Contract No. 4/6-95. (Scientific supervisor S.P. Dzhepo). Kyiv: Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Il'ichev V.A., Akhunov V.D. 1992. Research report: Study of radioactive waste burial sites, development of technologies and measures for their long-term localization and reburial, implementation of radiological and hydrogeological monitoring in the burial areas and adjacent territories. Report under Contract No. 720-N (V.A. Il'ichev, V.D. Akhunov). NIPromtekhologii Institute, Moscow–Chernobyl (In Russian).
- ISO (International Organization for Standardization). 2009. Water quality – Sampling – Part 11: Guidance on sampling of groundwaters. ISO 5667-11:2009. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO (International Organization for Standardization). 2014. Water quality – Sampling – Part 14: Guidance on quality assurance and quality control of environmental water sampling and handling. ISO 5667-14:2014. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO (International Organization for Standardization). 2021. Geotechnical investigation and testing – Sampling methods and groundwater measurements – Part 1: Technical principles for the sampling of soil, rock and groundwater. ISO 22475-1:2021. Geneva: International Organization for Standardization.
- Kashparov V., Salbu Brit, Levchuk S., Protsak V., Maloshtan I., Simonucci C., Courbet C., Nguyen H., Sanzharova N., Zabrotsky V. 2019. Environmental behaviour of radioactive particles from Chernobyl. *J. Env. Radioactivity*, 208–209, 106025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106025>.
- Kireev S.I., Demyanovich O.V., Smirnova K.I., Vishnevsky D.O., Obrizan S.M., Godun B.O., Gurin O.S., Nikitina S.I. 2013. Radiation situation at the territory of exclusion zone in 2012. *Problems of Chernobyl Exclusion Zone*, 11, 18–37. <http://www.chernobyl.net/wp-content/uploads/2018/01/digest-11.zip> (in Ukrainian).
- Kireev S. I., Nikitina T. I., Samoilov D. A., Buntova O. H., Fedorenko O. A., Pylypchuk T. V., Liaskivskiy V. V. 2024. Radiation state of the Chernobyl Exclusion Zone in 2023 based on the results of radiation and environmental monitoring. *Meteorology. Hydrology. Environmental Monitoring*, 1, 4–26. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001512747>
- Kiva S., Stelya O., Proskura N. 1996. Modeling the Migration of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs in the Subsurface from the Chernobyl NPP Unit-4 Shelter. *MRS Proceedings*, 465, 1335. <https://doi.org/10.1557/PROC-465-1335>
- Le Coz M., Pannecoucke L., Saintenoy A., de Fouquet C., Freulon X., Cazala C. 2023. Do transient hydrological processes explain the variability of strontium-90 activity in groundwater downstream of a radioactive trench near Chernobyl? *Journal of Environmental Radioactivity*, 259–260, 107101. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107101>
- Ledenev A.I., Ovcharov P.A., Mishunina I.B., Antropov V.M. 1995. Results of comprehensive studies of the radiation conditions of temporary localization points for radioactive waste in the exclusion zone of ChNPP. *Problems of Chernobyl Exclusion Zone*, 2, 46–50 (in Russian).
- Litvin A.I., Panasyuk M.I., Levin G.V., Onyschenko I.P. 2016a. Contamination by <sup>90</sup>Sr of groundwater at the territory of the "Shelter" object of the Chernobyl nuclear power plant. *Problems of Safety of Nuclear Power Plants and Chernobyl*, 26, 122–127 (in Ukrainian).
- Matoshko A.V. 1995. Schematic representation and zoning of the sedimentary cover of the Chernobyl Exclusion Zone for hydrogeological monitoring. *Problems of the Chernobyl Exclusion Zone*, 4, 95–108 (in Ukrainian).

- Matoshko A.V. 1996. Map of Quaternary deposits and zoning of the Quaternary sequence by types of geological sections. In: Shestopalov V.M. (Ed.), Atlas of the Chernobyl Exclusion Zone. Kyiv: Kartographia Publishing House, pp. 16–17.
- Matoshko A., Bugai D., Dewiere L., Skalsky A. 2004. Sedimentological study of the Chernobyl NPP site to schematize radionuclide migration conditions. *Environm. Geol.*, 46, 820–830. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1067-3>
- Matsala M., Bilous A., Myroniuk V., Holiaka D., Schepaschenko D., See L., Kraxner F. 2021. The Return of Nature to the Chernobyl Exclusion Zone: Increases in Forest Cover of 1.5 Times Since the 1986 Disaster. *Forests*, 12, 1024. <https://doi.org/10.3390/f12081024>
- Mishunina I.B., Ledenev A.I., Hvesyk O.V. 1995. Assessment of the degree of isolation of radionuclides in the temporary radioactive waste storage site in exclusion zone of ChNPP. *Problems of Chernobyl Exclusion Zone*, 2, 53–57 (in Russian).
- Molitor N., Drace Z., Bugai D., Sizov A., Haneke K., Thierfeldt S., Nitzsche O., Shapiro Y. 2017. Challenges and progress in improving safety and managing radioactive wastes at Chernobyl NPP in the Chernobyl Exclusion Zone. *Problems of nuclear plants' safety and of Chernobyl*, 29, 35–49. [http://www.ispnpp.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/2017\\_29/c35.pdf](http://www.ispnpp.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/2017_29/c35.pdf)
- Panasiuk N.I., Pavluchenko N.I., Pravdiviy A.A., Alferov A.M., Rudko V.M., Kozoriz V.I., Stoyanov A.I., Gula V.A., Onischenko I.P., Buzinny M.G., Kurochin A.A., Smolegovets V.N. 1999. Assessment of radioactive contamination of geological environment and estimation of amount of radioactive wastes localized in technogenic soils in the vicinity of the "Shelter" object. *ISTC "Ukritie". Chernobyl*, 16 p. Prepr. No. 99-2 (in Russian).
- Panasiuk M. I., Matrosov D. T., Petrosenko Ye. I., Levin H. V., Liushnia P. A., Sizov M. O., Palamar L. A., Onyshchenko, I. P. 2018. Levels of radioactive contamination of groundwater at the Chernobyl NPP industrial site and measures for limiting its spread. *Problems of Nuclear Power Plant Safety and of Chernobyl*, 30, 87–92 (in Ukrainian).
- Panasiuk M.I., Stoianov O.I., Liushyna P.A., Levin H.V., Palamar L.A., Onyshchenko I.P. 2019. Results of radiation monitoring in the area of the NSC-SO complex and measures to reduce groundwater contamination. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chernobyl*, 32, 74–79 (in Ukrainian).
- Sato H., Gusyev M., Veremenko D. Laptev G., Shibasaki N., Onda Y., Zheleznyak M., Kirieiev S., Nanba K., 2023. Evaluating changes in radionuclide concentrations and groundwater levels before and after the cooling pond drawdown in the Chernobyl Nuclear Power Plant vicinity. *Science of the Total Environment*, 872, 161997. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161997>
- Sellafield Ltd. 2017. Groundwater Monitoring at Sellafield. Annual Data Review 2016, LQTD000758. Sellafield, Sescal. Cumbria, UK.
- Sobotovitch Ye.V., Olshtynsky S.P. 1992. Geochemistry of the technogenic environment. Kyiv: Naukova Dumka. 228 p. (in Russian).
- Shestopalov V., Panasyuk N., Kukharenko D., Onyschenko I., Gudzenko V. 2002. Radioactive contamination of groundwater around the "Shelter" object. In: Shestopalov V. (Ed.), Chernobyl disaster and groundwater. A.A. Balkema Publishers, pp. 71–100.
- Smith J.T., Beresford N.A. 2005. Chernobyl: Catastrophe and Consequences. Berlin: Springer.
- Smith L., Gaganis P. 1998. Strontium-90 migration to water wells at the Chernobyl nuclear power plant: Re-evaluation of a decision model. *Environ. & Engineer. Geosci.*, 4 (2), 161–174.
- SOU-N MEV 40.1-00013741-79:2012. "Methodological Guidelines for Monitoring the Geological Environment at Nuclear Power Plants and Large Thermal Power Plants" (in Ukrainian).
- SSE Ecocenter. 2019. Concept for the Management of Water Resources in the Context of the Reorganization of Activities in the Exclusion Zone, the Establishment of a Biosphere Reserve, and the Zone of Special Industrial Use (Approved by Director General S.I. Kireev). SSE Ecocenter, Chernobyl (in Ukrainian).
- SSE Ecocenter. 2021. Statue of the State specialized enterprise "Ecocenter" (SSE "Ecocenter") Identification code 40248151. (New version). (Approved by the Order of State agency of the Ukraine on exclusion zone management from 16.04.2021 no.74-21). SSE Ecocenter, Chernobyl (in Ukrainian).
- US DOE. 2012. Scientific opportunities for monitoring at environmental remediation sites (SOMERS). Integrated System-Based Approaches to Monitoring. U.S. Department of Energy Office of Environmental Management.
- US EPA. 2007. Monitored Natural Attenuation of Inorganic Contaminants in Groundwater. EPA/600/R-07/139, United States Environmental Protection Agency.
- Van Meir N., Bugai D., Kashparov V. 2009. The Experimental Platform in Chernobyl: An international research polygon in the Exclusion Zone for soil and groundwater contamination. In: *Radioactive Particles in the Environment*. (Eds. D.H. Oughton, V. Kashparov). Springer Science+Business Media B.V., pp. 197–208.
- Voitsekhovych O.V., Kanivets V., Onishi Y. 2007. The Chernobyl Accident and Its Aquatic Impacts on the Surrounding Area. In: *Chernobyl – What Have We Learned?* (Eds. Y. Onishi, O.V. Voitsekhovych and M.J. Zheleznyak). Springer, pp. 9–47.

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.350725>

УДК 551.7:56:929

## Дмитро Єлисейович Макаренко – відомий палеонтолог-стратиграф України, популяризатор геологічної науки, енциклопедист, історик геологічних досліджень (до 100-річчя від дня народження)

E-mail: veklych.od@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-0017-8955>

Received / Надійшла до редакції:  
 10.10.2025

Received in revised form /  
 Надійшла у ревізованій формі:  
 26.01.2026

Accepted / Прийнята:  
 27.02.2026

О.Д. Веклич

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

**Dmytro Yelyseyovych Makarenko – a famous paleontologist-stratigrapher of Ukraine, popularizer of geological science, encyclopedist, historian of geological research (to the 100<sup>th</sup> anniversary of his birth)**

O.D. Veklych

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

**Keywords:** D.Ye. Makarenko, paleontology, biostratigraphy, Paleogene, Mesozoic, history of geology, Ukraine.

**Ключові слова:** Д.Є. Макаренко, палеонтологія, біостратиграфія, палеоген, мезозой, історія геології, Україна.

The article is dedicated to the 100th anniversary of the birth of the outstanding Ukrainian scientist, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor Dmytro Yelyseyovych Makarenko (1925–2008). The main stages of his life are highlighted: from participation in the Second World War to many years of fruitful work at the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine. The fundamental contribution of the scientist to paleontology and biostratigraphy of the Meso-Cenozoic is analyzed, in particular the description of more than 500 species of fossil mollusks, the development of stratigraphic schemes and the creation of paleogeological maps. D.Ye. Makarenko made a significant contribution to paleontological research, establishing more than 40 species of mollusks, cephalopods, rudists and brachiopods that are new to science. Special attention is paid to the activities of D.Ye. Makarenko as an encyclopedist and historian of science, who brought back from oblivion the names of dozens of Ukrainian geologists repressed by the totalitarian regime. The relevance of his scientific legacy for the implementation of modern state research topics is emphasized. The scientist published over 1,000 works during his lifetime, including over 350 scientific papers (20 monographs).

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2026. 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 National Academy of Sciences of Ukraine, 2026. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Цитування: Веклич О.Д. Дмитро Єлисейович Макаренко – відомий палеонтолог-стратиграф України, популяризатор геологічної науки, енциклопедист, історик геологічних досліджень (до 100-річчя від дня народження). *Геологічний журнал*. 2026. № 1 (394). С. 91–102. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.350725>

Citation: Veklych O.D. 2026. Dmytro Yelyseyovych Makarenko – a famous paleontologist-stratigrapher of Ukraine, popularizer of geological science, encyclopedist, historian of geological research (to the 100th anniversary of his birth). *Geologichnij zhurnal*, 1 (394), 91–102. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2026.1.350725>

Минуло 100 років від дня народження та 17 років з часу відходу у вічність Дмитра Єлисейовича Макаренка – особистості, яка стала уособленням цілої епохи в українській геології. Видатний український палеонтолог-стратиграф, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, він пройшов складний, але гідний шлях: від випробувань Другої світової війни до наукових вершин.

Понад півстоліття трудової діяльності Дмитра Єлисейовича були нерозривно пов'язані з Інститутом геологічних наук (ІГН) НАН України. Тут він пройшов шлях від аспіранта до головного наукового співробітника, протягом 18 років очолював відділ стратиграфії і палеонтології мезозойських відкладів та вісім років обіймав посаду першого заступника директора з наукової роботи.

Наукові праці вченого були присвячені вивченню конхіліофауни, біостратиграфії та палеогеографії палеогенових, крейдових та юрських відкладів України, проблемам загальної та морської геології, історії геологічних досліджень в Україні, збереженню славетних імен геологів, репресованих комуністичним режимом у 20–50-х роках ХХ ст., поширенню геологічних знань серед широких верств населення.

## Основні віхи життя Дмитра Єлисейовича Макаренка

Дмитро Єлисейович Макаренко народився 6 листопада 1925 р. у с. Москалівка (нині Роменський район Сумська область) в сім'ї фельдшера Єлисея Семеновича. Мати його, Варвара Пимонівна, працювала в колгоспі. В родині було двоє дітей – Дмитро та його молодша сестра Катерина. Хлопчик змалку був привчений до праці, мав загострене відчуття справедливості, бачив більшовицьку колективізацію, потерпав від голодомору. У 1933–1937 рр. він навчався у Москалівській початковій школі, 1937–1941 рр. – у Глинській, 1944–1945 рр. і 1946–1947 рр. – у Перекопівській (Роменський район) середніх школах (Шушківський, 2015).

У вересні 1943 р. Дмитро Єлисейович був призваний до лав Червоної армії. Як червоноармієць-мінометник 712-го стрілецького



Дмитро Єлисейович Макаренко  
(06.11.1925 – 31.12.2008)

Dmytro Yelyseyovych Makarenko  
(06.11.1925 – 31.12.2008)

полку 232-ї стрілецької дивізії Першого Українського фронту брав участь у визволенні Лівобережної України. В бою за м. Бориспіль Київської області Д.Є. Макаренко був поранений. Від початку 1945 р. він знову на військовій службі: спочатку був направлений у 144-й запасний стрілецький полк Першого Українського фронту (Донецька та Луганська області), а звідти – курсантом до 24-го учебного танкового полку в м. Дзержинськ Горьківської області (нині Нижньогородської області, РФ). Відтоді до демобілізації наприкінці 1946 р. Дмитро Єлисейович був командиром 85-міліметрової гармати на танку

Т-34 107-го гвардійського механізованого полку (Одеська та Миколаївська області).

Молодший сержант Д.Є. Макаренко був нагороджений орденами Великої Вітчизняної війни 2-го ступеня та «За мужність» 3-го ступеня, медаллю «За перемогу над Німеччиною 1941–1945 рр.» (Шушківський, 2015).

Упродовж 1947–1952 рр. Дмитро Єлисейович був студентом геологічного факультету Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка. В 1952 р. він вступив до аспірантури ІГН АН УРСР і був одним з перших аспірантів професора Михайла Миколайовича Ключникова, який став його науковим керівником. У 1955 р. Д.Є. Макаренко захистив кандидатську дисертацію «Фауна моллюсков нижнетретичных отложений северо-западной части Украинского кристаллического массива» (Макаренко, 1955). Того ж року він отримав учений ступінь кандидата геолого-мінералогічних наук (Дмитро..., 2008).

Дмитро Єлисейович усе трудове життя (53 роки) пропрацював у ІГН АН УРСР: 1955–1961 рр. був молодшим науковим співробітником, 1961–1977 рр. – старшим науковим співробітником у відділі стратиграфії і палеонтології кайнозойських відкладів, 1978–1996 рр. – завідувачем відділу стратиграфії і палеонтології мезозойських відкладів, водночас у 1980–1987 рр. – першим заступником директора з наукової роботи, від 1996 р. – головним науковим співробітником (від 1999 р. – за контрактом) (Дмитро..., 2008).

У 1963 р. вченому було присвоєно вчене звання «старший науковий співробітник» за фахом «палеонтологія і стратиграфія». У 1971 р. Д.Є. Макаренко захистив докторську дисертацію «Моллюски палеоценовых отложений платформенной Украины и их биостратиграфическое значение» (Макаренко, 1971). У 1976 р. був нагороджений Почесною грамотою Міністерства геології УРСР.

У 1978–1979 рр. дослідник був учасником, а саме начальником загону біостратиграфії, 19-го рейсу спеціалізованої комплексної геолого-геофізичної експедиції на науково-дослідному судні (НДС) «Академік Вернадський» в Індійському океані із заходами в Танзанію, Індію, Сінгапур, на Сейшельські острови, Маврикій, Цейлон (Дмитро..., 2008).

З 1978 по 1996 р. вчений був завідувачем відділу стратиграфії і палеонтології мезозойських відкладів ІГН АН УРСР. У 1980–1987 рр. Д.Є. Макаренко став першим заступником директора ІГН АН УРСР з наукової роботи. У 1985 р. був нагороджений Почесною грамотою Президії Академії наук УРСР та медаллю «Ветеран труда». У 1989 р. Дмитро Єлисейович був удостоєний звання лауреата Державної премії УРСР за колективну восьмитомну працю «Геология шельфа УССР» (1981–1987). У 1992 р. Д.Є. Макаренку присвоєно

вчене звання професора за фахом «палеонтологія і стратиграфія». У 1996 р. він був нагороджений Почесною грамотою Президії Академії наук України (Дмитро..., 2008).

Дмитро Єлисейович, вийшовши на пенсію 15 грудня 1999 р., продовжив працювати за контрактом в ІГН НАН України. В 2003 р. Д.Є. Макаренко був нагороджений пам'ятним знаком «60 років визволення м. Києва від фашистських загартників», у 2006 р. – Золотим нагрудним знаком Всеукраїнської громадської організації Спільки геологів України.

31 грудня 2008 р. Дмитро Єлисейович Макаренко пішов з життя.

### Наукова діяльність та наукові здобутки Д.Є. Макаренка

Свою трудову діяльність в ІГН НАН України Дмитро Єлисейович розпочав у відділі стратиграфії і палеонтології кайнозойських відкладів, в якому пропрацював з 1955 до 1977 р.

Напрями наукової діяльності Д.Є. Макаренка – це насамперед біостратиграфічні дослідження, палеогеографічні реконструкції, історії геологічних досліджень, науково-педагогічна діяльність, популяризація геологічної науки (Дмитро..., 2008).



Співробітники відділу стратиграфії і палеонтології кайнозойських відкладів ІГН АН УРСР, 1972 р. Зліва направо: 1 ряд – З.М. Сатановська, В.О. Зелінська, Є.Я. Краєва, В.Я. Дідковський, В.Г. Куліченко, Н.В. Маслун; 2 ряд – В.М. Семененко, Л.П. Зубанєва, О.П. Ольштинська, А.А. Білоцерковець, В.С. Будник, О.В. Терещук, О.В. Лукашов, В.С. Горбунов; 3 ряд – В.Ю. Зосимович, Д.Є. Макаренко, М.М. Іванік

Employees of the Department of Stratigraphy and Paleontology of Cenozoic Deposits, Institute of Geology, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1972. From left to right: first line – Z.M. Satanovska, V.O. Zelinska, E.Ya. Kraieva, V.Ya. Didkovsky, V.G. Kulichenko, N.V. Maslun; second line – V.M. Semenenko, L.P. Zubaneva, O.P. Olshtynska, A.A. Bilotserkovets, V.S. Budnik, O.V. Tereshchuk, O.V. Lukashov, V.S. Gorbunov; third line – V.Yu. Zosymovich, D.Ye. Makarenko, M.M. Ivanik

Основні наукові інтереси дослідника стосувалися проблем стратиграфічного розчленування кайнозойських і мезозойських відкладів, вивчення систематичного складу фауни молюсків і фізико-географічних умов окремих епох мезокайнозою.

**Палеонтологічні дослідження молюсків.** Дмитро Єлисейович встановив систематичну належність понад 500 видів молюсків, у тому числі нових для науки 19 форм з класу черевоногих, 14 – з класу двостулкових, двох – з класу лопатоногих, чотирьох – з класу панцирних та одної – з класу головоногих; уперше у відкладах палеогенової системи України знайшов та описав рідкісну форму роду *Paramonoplenra*, кілька видів панцирних молюсків (mun Loricata), представників типу Brachiopoda-Crania. Встановив новий рід з родини Rudistae та два нових види замкових і беззамкових брахіопод (Шушківський, 2015). Д.Є. Макаренко зробив суттєвий внесок у палеонтологічні дослідження, встановивши понад 40 нових для науки видів молюсків, рудистів і брахіопод (Іванік та ін., 2018).

У своїй праці «Раннепалеоценовые моллюски Северной Украины» (Макаренко, 1970) Д.Є. Макаренко навів геологічні дані й описав основні розрізи нижнього палеоцену, обґрунтував вік лузанівських верств, які розглядаються автором як мілководний аналог сумської світи Північної України та синхронні зеландській світи Данії та Швеції, монським ярусам Бельгії та ін. Вперше були описані понад 60 видів двостулкових і лопатоногих молюсків із знову відкритого виходу палеоцену з с. Лузанівка біля м. Сміла. Фауна була зображена у 22 таблицях.

У монографії Дмитра Єлисейовича «Гастроподы нижнего палеоцена Северной Украины» (Макаренко, 1976) були наведені результати вивчення фауни молюсків нижньопалеоценових відкладів Північної України. В ній вперше було описано 141 вид брюхоногих і чотири види панцирних молюсків. Вміщуючі фауну верстви розглядалися як сполучна ланка між палеоценовими відкладами Східної та Західної Європи.

Інша праця Д.Є. Макаренка «Моллюски среднего эоцена платформенной Украины» (Макаренко, Зелінська, 1982), написана у співавторстві з В.О. Зелінською, була присвячена результатам вивчення відкладів буцацької світи України. В ній з нових позицій трактувався об'єм і склад середньоєоценових відкладів України. Вперше було описано 221 вид двостулкових, брюхоногих і лопатоногих молюсків середнього еоцену, що заповнило прогалину в пізнанні палеогенової фауни. В роботі також наведено схематичну карту географічного розповсюдження буцацьких молюсків, таблицю стратиграфічного та вікового поширення описаних форм, таблицю ймовірного об'єму осадків середнього еоцену України та 37 фототаблиць досліджених видів.

**Стратиграфічні та палеогеографічні дослідження.** Д.Є. Макаренко як стратиграф зробив значний внесок у вдосконалення та біостратиграфічне обґрунтування границь підрозділів стратиграфічної схеми палеогенової системи, як палеонтолог – у пізнання тваринного світу різних епох палеогенового, крейдового й юрського періодів історії Землі.



Привітання Д.Є. Макаренка з отриманням Державної премії УРСР за колективну восьмитомну працю «Геологія шельфа УРСР» (1981–1987). 1989 р. Фото з архіву Д.Є. Макаренка

Greetings D.Ye. Makarenko with the title of laureate of the State Prize of the Ukrainian SSR for his collective eight-volume work "Geology of the Shelf of the Ukrainian SSR" (1981–1987). 1989. Photo from the archive of D.Ye. Makarenko

У 80-х роках ХХ ст. вченими ІГН АН УРСР, серед яких був Д.Є. Макаренко, були складені кореляційні схеми палеозою о-ва Зміїний, розроблені нові стратиграфічні схеми мезозою шельфу Чорного моря та Причорномор'я. За проектом № 25 Міжнародної програми геологічної кореляції ЮНЕСКО (МПК) «Стратиграфічна кореляція Паратетису і Тетису» здійснено кореляцію міоцену–пліоцену із застосуванням нової методики – виділення «датованих рівнів» за планктоном, ув'язаних із палеомагнітною та радіохронологічною шкалами. Крім того, вперше зроблено пряме зіставлення регіоюрів міоцену–пліоцену Евксинсько-Каспійського басейну, визначено їх тривалість (Гожик та ін., 2017).

Дмитро Єлисейович вивчав геологічну будову різних регіонів України, геологію дна Світового океану, родовища корисних копалин. У 1989 р. за участь у написанні колективної восьмитомної праці «Геология шельфа УССР» (1981–1987) (Геология..., 1984, 1987) він був відзначений Державною премією УРСР у галузі науки і техніки.

Д.Є. Макаренко присвятив не одну наукову працю палеогеографічним реконструкціям древніх геологічних епох, зокрема мезозойської та кайнозойської ер, і побудові палеогеографічних карт. При реконструкціях фізико-географічних умов окремих епох перед автором було завдання з'ясувати такі важливі фактори середовища, як температура та солоність морської води, глибина басейну та його газовий режим, характер ґрунту, біологічне оточення та ін. Основним джерелом були роботи із систематики викопних організмів, які мають багатоцільове використання. Дмитром Єлисейовичем у низці наукових статей та збірників були висвітлені проблеми палеогеографії й екології, а саме: у співавторстві «Экология беспозвоночных третичных морей Украины» (Дидковський

та ін., 1971), «Палеогеографія території України в ранньопалеоценовий час» (Макаренко, 1973), «Палеогеографія території платформеної України в пізньому палеоцені» (Макаренко, 1974) та ін. Вперше побудована ним палеогеографічна карта київського регіоюрусу палеогену ввійшла до «Атласу палеогеографічних карт Української і Молдавської РСР (з елементами літофацій)» (Макаренко, 1960) (Дмитро..., 2008).

Науковий доробок дослідника налічує понад 350 наукових робіт (з них 20 монографій), а також довідники, атласи, брошури, статті, загальна кількість публікацій сягає понад тисячу (Гожик та ін., 2017). Найвагоміші праці Д.Є. Макаренка такі: «Молюски палеоценових відкладів Криму» (Макаренко, 1961), у складі авторського колективу Є.Я. Краєва, Д.Є. Макаренко, О.К. Каптаренко-Черноусова, М.М. Ключников, С.І. Пастернак, М.В. Ярцева, Б.Ф. Зернецький, Г.І. Молякко «Стратиграфія УРСР. Т. 9: Палеоген» (Макаренко, 1963), «Раннепалеоценовые моллюски Северной Украины» (Макаренко, 1970), «Гастроподы нижнего палеоцена Северной Украины» (Макаренко, 1976), у складі авторського колективу «Развитие и смена моллюсков на рубеже мезозоя и кайнозоя» (Белякова и др., 1981), у співавторстві з В.О. Зелінською «Моллюски среднего эоцена платформенной Украины» (Макаренко, Зелінська, 1982), в складі колективу авторів «Биостратиграфическое обоснование границ в палеогене северной и экваториальной частей Индийского океана» (Шнюков и др., 1984) та «Стратиграфическая схема палеогеновых отложений Украины» (Зернецький и др., 1987), у співавторстві з І.А. Майдановичем «Геология и генезис янтареносных отложений Украинского Полесья» (Майданович, Макаренко, 1988), у складі авторського колективу «Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Стратиграфия»



Найвизначніші праці Д.Є. Макаренка  
The most significant works of D.Ye. Makarenko

(Айзенберг и др., 1988), у співавторстві з К.В. Диканем «Двустворчатые и брюхоногие моллюски верхней юры Днепровско-Донецкой впадины» (Дикань, Макаренко, 1990) (Шушківський, 2015).

**Участь у морській експедиції.** У 1979 р. Д.Є. Макаренко очолив загін біостратиграфів спеціалізованої комплексної геолого-геофізичної експедиції 19-го рейсу НДС «Академік Вернадський». Дослідницькі роботи проводилися в Індійському океані із заходами в Танзанію, Маврикій, Цейлон, Індію, Сингапур, на Сейшельські острови. Результатом робіт став цикл препринтів з різних галузей геології для комплексного вивчення дна Світового океану, зокрема «Донные осадки тектонически активной зоны Аравийско-Индийского хребта» (Гожик и др., 1979). Також Дмитро Єлисейович мав змогу вести неонтологічні спостереження в Індійському океані – співіснування різних представників органічного світу – колоніальних та одиничних коралів, породоутворюючих червоних вапнистих водоростей, голкошкірих (м'які морські їжаки, діадеми), морських зірок, численних родів черевоногих і двостулкових моллюсків, кальмарів, глибоководних губок тощо (Дмитро..., 2008). Це поглибило його уявлення про сучасні організми для реконструкцій умов давніх морських басейнів України й екосистем минулого Землі (метод актуалізму).

## Нагороди та членства у товариствах, комісіях

Д.Є. Макаренко був нагороджений орденами Великої Вітчизняної війни 2-го ступеня та «За мужність» 3-го ступеня, медаллю «За Перемогу над Німеччиною 1941–1945 рр.» і 12 ювілейними медалями (Дмитро..., 2008). Він був неодноразовим учасником інститутських зборів, присвячених Дню Перемоги.

Крім того, Дмитро Єлисейович був нагороджений Почесною грамотою Міністерства геології УРСР (1976), Почесною грамотою Президії АН УРСР, а також медаллю «Ветеран труда» (1985), Почесною грамотою НАН України (1996), пам'ятним знаком «60 років визволення м. Києва від фашистських загарбників» (2003), Золотим нагрудним знаком Всеукраїнської громадської організації «Спілка геологів України» (2006) (Дмитро..., 2008).

Учений був членом Палеонтологічного товариства СРСР, Українського палеонтологічного товариства (з часу заснування у 1977 р.), Палеогенової комісії Міжвідомчого стратиграфічного комітету СРСР, очолював Мезозойську комісію Національного стратиграфічного комітету України (Дмитро..., 2008).

Дмитро Єлисейович був активним учасником сесій Українського палеонтологічного товариства, які проводились в різних містах колишнього СРСР (м. Керч, 1980 р., м. Кам'янець-Подільський, 1986 р., м. Канів, 1987 р. та ін.), а також польових робіт у численних експедиціях.



Члени УПТ, м. Кам'янець-Подільський, травень 1986 р. Зліва направо: Ф.А. Станіславський, Д.Є. Макаренко, І.М. Шайкін, І.М. Ямниченко, В.І. Гаврилишин, М.Я. Бланк. Фото з архіву Д.Є. Макаренка

Members of the UPS, Kamianets-Podilskyi, May 1986. From left to right: F.A. Stanislavsky, D.Ye. Makarenko, I.M. Shaikin, I.M. Yamnychenko, V.I. Havrylyshyn, M.Ya. Blank. Photo from the archive of D.Ye. Makarenko



Д.Є. Макаренко, м. Тираспіль, Школа по пелециподах, 1978 р. Фото з архіву Д.Є. Макаренка

D.Ye. Makarenko, Tyraspol, School of pelecypods, 1978. Photo from the archive of D.Ye. Makarenko

## Наукове керівництво аспірантами, опонування, рецензування та науково-педагогічна діяльність

Д.Є. Макаренко був науковим керівником і підготував сім кандидатів геолого-мінералогічних наук, зокрема в ІГН НАН України – Л.М. Якушина (пізніше захистив докторську дисертацію), К.В. Диканя, А.Б. Соколова, В.В. Хатимлянського, І.В. Чаус. Крім того, підготував двох кандидатів з Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка – І.П. Соколова, В.М. Закалюжного. Вчена рада ІГН АН України 2 липня 1992 р. присвоїла йому вчене звання професора за спеціальністю «палеонтологія і стратиграфія», яке в тому ж році було затверджено МОН України. Д.Є. Макаренко був офіційним опонентом і брав участь у рецензуванні 30 кандидатських і 15 докторських дисертацій, присвячених вивченню стратиграфії осадової товщі різних систем фанерозою (Дмитро..., 2008).

Д.Є. Макаренко брав участь у виданні «Руководства по учебной геологической практике в Крыму и атласа руководящих форм» (т. 1, 1973) (Немков и др., 1973). Також Дмитро Єлисейович був багаторазовим учасником шкіл макрофауністів, які проводились в різних районах колишнього СРСР (м. Тираспіль, 1978 р., м. Душанбе, 1982 р.). На засіданнях цих шкіл навчались, слухали доповіді маститих вчених та обмінювались досвідом.

## Енциклопедист, історик геологічних досліджень та популяризатор геологічної науки

Д.Є. Макаренко як популяризатор геологічної науки плідно працював з багатьма обласними та республіканськими газетами, видав дві брошури «Що треба знати про молюсків» (Макаренко, 1959) і «Коштовні перлини» (Макаренко, 1968), а також у співавторстві із С.Т. Звольським невеличку книгу «В битвах Великой Вітчизняної загартовані» (Макаренко, Звольський, 1995) про геологів-співробітників ІГН АН України, які воювали на різних фронтах Другої світової війни з німецькими й японськими загарбниками.

З часу створення Українського палеонтологічного товариства (УПТ), заснованого 1977 р., вчений активно брав участь у його роботі як доповідач і постійний член редакційної колегії. Від 1984 р. і до кінця життя був членом редколегії «Геологічного журналу», присвятивши майже 20 років вивченню історії геологічних досліджень, більшість статей належала перу Д.Є. Макаренка. Від перших днів існування журналу «Геолог України», заснованого 2003 р., Дмитро Єлисейович був і його постійним автором (Шушківський, 2015).

Роль Д.Є. Макаренка як енциклопедиста важко переоцінити, оскільки він фактично був не просто автором, а й куратором геологічного напрямку. Вчений багато зробив для розвитку українського енциклопедознавства, його перші енциклопедичні статті з'явилися у першому

виданні «Української радянської енциклопедії» (УРЕ): «Ласкарев Володимир Дмитрович» (Макаренко, 1962a), «Майкопська серія» (Макаренко, 1962b) (обидві 1962 р., т. 8) та ін. До другого видання цієї енциклопедії він підготував такі публікації: «Еоценова епоха і еоценовий відділ» (Макаренко, 1979a), «Кайнозойська ера і група» (Макаренко, 1979b, т. 4), «Мезозойська ера і група» (Макаренко, 1981, т. 6), «Нумуліти» (Макаренко, 1982a, т. 7), «Олігоценова епоха і олігоценовий відділ» (Макаренко, 1982b), «Орнітоподи» (Макаренко, 1982c), «Палеогеновий період і палеогенова система» (Макаренко, 1982d), «Палеоценова епоха і палеоценовий відділ» (Макаренко, 1982i) (усі – 1982 р., т. 8), «Рудисти» (Макаренко, 1983, т. 9), «Тафономія» (Макаренко, 1984a), «Тентакуліти» (Макаренко, 1984b), «Фанерозой» (Макаренко, 1984c) (усі – 1984 р., т. 11, кн. 1) та ін. За його авторства в «Українському радянському енциклопедичному словнику» надруковані статті «Лемурія» (Макаренко, 1987a) та «Лона» (Макаренко, 1987b) (обидві – 1987 р., т. 2). У «Географічній енциклопедії України» вийшли друком такі праці: «Геологічні дослідження» (Шнюков, Макаренко, 1989) (1989 р., т. 1, у співавторстві з Є.Ф. Шнюковим), «Крейдовий період» (Макаренко, 1990a) і «Крейдова система» (Макаренко, 1990b) (обидві – 1990 р., т. 2) та ін. Д.Є. Макаренком тільки у перших 15-ти томах ЕСУ надруковано 197, а у співавторстві – 20 статей (Шушківський, 2015).

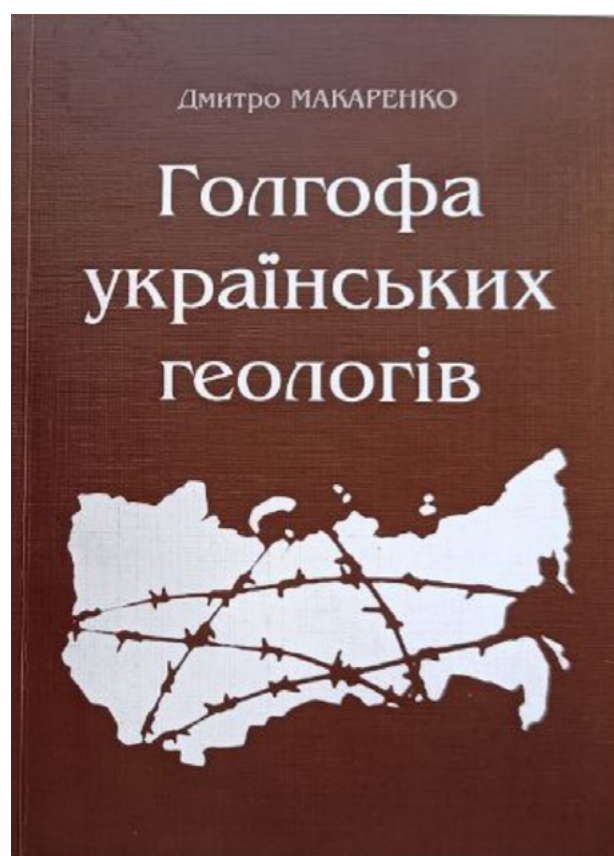
Учений багато часу приділяв роботі в редакційних колегіях не тільки видань ІГН НАН України та різних журналів геологічного профілю, а й був членом Головної редколегії «Енциклопедія сучасної України», фактично головним консультантом з питань палеонтології для національних енциклопедичних видань.

Д.Є. Макаренко дуже багато зробив у галузі історії геологічних досліджень в Україні, регулярно висвітлюючи ювілейні дати геологічних інститутів, установ і їх організаторів, а також відродженні інформації про видатних особистостей, які були репресовані в часи тоталітарного режиму. Він одним із перших почав висвітлювати правдиву інформацію про геологів, гірничих інженерів, географів, які були репресовані радянською владою або зазнали переслідувань від неї. Вчений розкривав і засуджував злочини більшовицького режиму, цинічне нищення людської особистості, її свободи й ідеалів. Д.Є. Макаренко повернув «до життя після

смерті» імена багатьох замовчених десятки років діячів української науки. Працюючи в царині історії геології, неодноразово звертався до закритих архівних матеріалів, зокрема й спецслужб (Шушківський, 2015).

Підсумком кропіткої багаторічної праці Д.Є. Макаренка, яка заслуговує на велику пошану, стали такі публікації: «Микола Омелянович Макаренко» (Макаренко, 1992), «Репрессированные геологи» (Макаренко, 1995, 1999), «Шлях до храму. Археолог, художник, мистецтвознавець Микола Макаренко» (Макаренко, 2006), «Голгофа українських геологів» (Макаренко, 2007). Неоцінним внеском дослідника в історію геологічних досліджень в Україні є відродження інформації про видатних особистостей, які були репресовані в часи тоталітарного сталінського режиму.

Дмитро Єлисейович з часу здобуття Україною незалежності понад 15 років опрацьовував матеріали архівів, переписувався з родичами репресованих геологів України. Як наслідок, побачила світ його монографія «Голгофа українських геологів» (Макаренко, 2007). Це меморіальна книга про долі 55 геологів (фахівців) за часів



Одна з останніх праць Д.Є. Макаренка «Голгофа українських геологів». 2007 р.

One of the latest works by D.Ye. Makarenko "The Calvary of Ukrainian Geologists". 2007

тоталітаризму та злочинів сталінського режиму, які стали жертвами і були розстріляні та знищені у таборах ГУЛАГу. Д.Є. Макаренко описав життєвий шлях кожного репресованого вченого, геолога-виробничника, їх трагічну долю та горе, яке спіткало родини, висвітливши доробок кожного дослідника в геологічну науку.

Учений залишив по собі неоціненний спадок у вигляді наукових та іншого спрямування праць, які ми ще маємо вивчити та глибину яких досягнути. Широкої геологічній громадськості він відомий як видатний вчений, який зробив суттєвий внесок у різні напрями геологічної науки – палеонтологію, стратиграфію, палеогеографію, був істориком, енциклопедистом і популяризатором геологічних досліджень. Наукова спадщина Д.Є. Макаренка вражає своєю масштабністю – понад 1000 публікацій, серед яких 20 монографій. Він виховав плеяду послідовників – підготував сім кандидатів наук. Його праця була відзначена Державною премією УРСР і численними державними нагородами. Своєю визначною натхненною працею, всім життям Дмитро Єлисейович Макаренко ввійшов в історію геологічної науки.

У житті Дмитро Єлисейович Макаренко був невтомною, працюючою, акуратною, відповідальною, шанобливою людиною та багатогранною особистістю. Один лише факт

про Дмитра Єлисейовича, який красномовно характеризує його як відповідальну і шанобливу людину. Кожного року, коли настава весна, він обходив всі кладовища Києва і наводив лад на могилах ветеранів-геологів і геологів, які в кінці життя залишились самотніми, засвідчуючи їм свою шану.

31 грудня 2008 р. Дмитро Єлисейович Макаренко пішов з життя – «один з останніх динозаврів», як він сам про себе казав.

Праці про життєвий шлях і наукові здобутки Д.Є. Макаренка наведені у 16 публікаціях за різні роки (Палеонтологи..., 1968; Всесоюзное..., 1984; Інститут..., 1986; Гожик, Молявко, 1996; Гожик, 2005; Лещух, 2005; Зернецький, Лещух, 2008; Зернецький, 2009; Бушак, 2009; Дикань, 2015; Гожик та ін., 2009, 2017; Шушківський, 2017 та ін.).

*Робота присвячена непересічній особистості – знаному палеонтологу-стратиграфу, доктору геолого-мінералогічних наук, професору Дмитру Єлисейовичу Макаренку. Робота виконана до 100-річчя заснування Інституту геологічних наук НАН України (травень 2026 р.) за держбюджетною темою відділу стратиграфії і палеонтології мезозойських відкладів ІГН НАН України «Біота тріас-нижньопалеогенових відкладів України: таксономічні, стратиграфічні та палеогеографічні аспекти» (ДР № 0126U000990, КПКВК 6541030).*

Стаття присвячена 100-річчю від дня народження видатного українського вченого, доктора геолого-мінералогічних наук, професора Дмитра Єлисейовича Макаренка (1925–2008). Висвітлено основні етапи його життєвого шляху: від участі у Другій світовій війні до багаторічної плідної праці в Інституті геологічних наук НАН України. Проаналізовано фундаментальний внесок вченого у палеонтологію та біостратиграфію мезо-кайнозою, зокрема опис понад 500 видів викопних молюсків, розробку стратиграфічних схем і створення палеогеографічних карт. Д.Є. Макаренко зробив суттєвий внесок у палеонтологічні дослідження, встановивши понад 40 нових для науки видів молюсків, головоногих, рудистів і брахіопод. Особливу увагу приділено діяльності Д.Є. Макаренка як енциклопедиста й історика науки, який повернув із забуття імена десятків українських геологів, репресованих тоталітарним режимом. Підкреслено актуальність його наукового спадку для виконання сучасних державних науково-дослідних тем. Вчений за життя опублікував понад 1000 робіт, з них понад 350 наукових праць (20 монографій).

## Список літератури

Айзенберг Д.Є., Берченко О.И., Бражникова Н.Е., Вдовенко М.В., Винниченко Л.В., Винниченко Л.Г., Воронова М.А., Высочанский И.В., Горак С.В., Горбунов В.С., Зосимович В.Ю., Иванников А.В., Козицкая Р.И., Кононенко Л.П., Котляр О.Е., Куличенко В.Г., Липник Е.С., Лукин А.Е., Макаренко Д.Е., Макридина Л.В., Немировская Т.И., Онуфришин С.В., Пермьяков В.В., Полетаев В.И., Савронь Э.Б., Станиславский Ф.А., Стерлин Б.П., Ткаченко Р.Ю., Устиновский Ю.Б., Христофорова Т.Ф., Шелкопляс В.Н., Щеголев А.К., Ямниченко И.М. Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Стратиграфия. Киев: Наукова думка. 1988. 148 с.

Аристов В.В., Баринев И.В., Беляков Л.П., Вольфсон Ф.И., Зоненшайн Л.П., Кузнецов С.В., Макаренко Д.Е., Хисамутдинов Н.И., Чесноков С.В., Шатков Г.А. Репрессированные геологи. 3-е изд., исправ. и доп.: Орлов В.П. (глав. ред.). Москва; СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 452 с.

Белякова Г.М., Бойкова Н.Н., Горбач Л.П., Джабарова В.В., Калишевич Т.Г., Макаренко Д.Е., Мартинсон Г.Г., Миронова Л.В., Мороз С.А., Парамонова Н.П., Пергамент М.А., Толстикова Н.В. Класс Bivalvia. Двустворчатые моллюски. Развитие и смена моллюсков на рубеже мезозоя и кайнозоя. Москва: Наука, 1981. С. 4–71.

Бушак С. Видатний історик української геології. *Геолог України*. 2009. № 1–2. С. 121–123.

Всесоюзное палеонтологическое общество: Справочник. Ленинград: Наука, 1984. 258 с.

Геология шельфа УССР. Стратиграфия (шельф и побережье Черного моря): Тесленко Ю.В. (отв. ред.). Киев: Наукова думка, 1984. 184 с.

Геология шельфа УССР. Тектоника. Соллогуб В.Б. (отв. ред.). Киев: Наукова думка. 1987. 150 с.

Гожик П.Ф. Дмитро Єлисейович Макаренко: до 80-річчя від дня народження. *Геол. журн.* 2005. № 4 (314). С. 129–130.

- Гожик П.Ф., Макаренко Д.Е., Иваник М.М., Мельник В.И. Донные осадки тектонически активной зоны Аравийско-Индийского хребта. Киев, 1979. 58 с. (Препр. / Ин-т геол. наук АН УССР; № 79-20).
- Гожик П.Ф., Маслун Н.В., Єфіменко В.І., Жабіна Н.М., Очаковський В.Ю., Шевченко Т.В., Супрун І.С. Палеонтологічне товариство України. Київ: ІГН НАН України, 2017. 120 с.
- Гожик П.Ф., Маслун Н.В., Носовський О.Ю. Пам'яті професора Дмитра Єлисейовича Макаренка. *Геол. журн.* 2009. № 1 (326). С. 112–113.
- Гожик П.Ф., Молявко В.Г. Дмитро Єлисейович Макаренко: до 70-річчя від дня народження. *Геол. журн.* 1996. Вип. 1–2 (281). С. 220.
- Дидковский В.Я., Зелинская В.А., Зернецкий Б.Ф., Зосимович В.Ю., Иваник М.М., Краева Е.Я., Куличенко В.Г., Макаренко Д.Е., Маслун Н.В., Семененко В.Н. Биостратиграфическое обоснование границ в палеогене и неогене Украины. Киев: Наукова думка, 1979. 202 с.
- Дидковский В.Я., Зернецкий Б.Ф., Зосимович В.Ю., Краева Е.Я., Макаренко Д.Е., Семененко В.Н. Некоторые вопросы палеогеографии и палеобиогеографии палеогеновых и неогеновых бассейнов территории Украины. *Экология беспозвоночных третичных морей Украины*. Киев: Наукова думка, 1971. 142 с.
- Дикань К.В. До 115-річчя О.К. Каптаренко-Черноусової, 105-річчя І.М. Ямниченка, 90-річчя Д.Є. Макаренка та 65-річчя відділу стратиграфії і палеонтології мезозойських відкладів Інституту геологічних наук НАН України. *Геол. журн.* 2015. № 1 (350). С. 123–126. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2015.1.139342>
- Дикань К.В., Макаренко Д.Е. Двустворчатые и брюхоногие моллюски верхней юры Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Наукова думка, 1990. 138 с.
- Дмитро Єлисейович Макаренко: Біобібліографічний покажчик. Київ: Логос, 2008. 39 с.
- Зернецкий Б.Ф., Зелинская В.А., Бланк М.Я., Зосимович В.Ю., Иваник М.М., Краева Е.Я., Макаренко Д.Е., Маслун Н.В., Стотланд А.Б. Стратиграфическая схема палеогеновых отложений Украины. Киев: Наукова думка, 1987. 116 с.
- Зернецкий Б.Ф. Знавець кайнозойських моллюсків (пам'яті професора Дмитра Єлисейовича Макаренка). *Вісник фауни і флори України: Палеонтологічний та стратиграфічний аспекти*: 36. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України. Київ, 2009. С. 416–418.
- Зернецкий Б., Лещух Р. Видатний палеонтолог України Д.Є. Макаренко (пам'яті професора Дмитра Єлисейовича Макаренка). *Палеонтол. зб.* 2008. № 40. С. 143–145.
- Зернецкий Б.Ф. Пам'яті професора Дмитра Єлисейовича Макаренка. *Геолог України*. 2009. № 1–2. С. 175–176.
- Иваник М.М., Жабіна Н.М., Дикань К.В., Шевчук О.А. Відділ стратиграфії та палеонтології мезозойських відкладів Інституту геологічних наук НАН України – джерело української палеонтології і стратиграфії. *Геол. журн.* 2018. № 4 (365). С. 81–102. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2018.4.148469>
- Институт геологических наук: Справочник. Киев: Наукова думка, 1986. 105 с.
- Лещух Р. Дмитро Єлисейович Макаренко: до 80-річчя від дня народження. *Палеонтол. зб.* 2005. № 37. С. 136.
- Майданович И.А., Макаренко Д.Е. Геология и генезис янтареносных отложений Украинского Полесья. Киев: Наукова думка, 1988. 84 с.
- Макаренко Д.Е. Гастроподы нижнего палеоцена Северной Украины. Киев: Наукова думка, 1976. 180 с.
- Макаренко Д.Е. Моллюски палеогеновых отложений платформенной Украины и их биостратиграфическое значение. Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук / Ин-т геол. наук АН УССР. Киев, 1971. 34 с.
- Макаренко Д.Е., Зелинская В.А. Моллюски среднего эоцена платформенной Украины. Киев: Наукова думка, 1982. 207 с.
- Макаренко Д.Е. Раннепалеогеновые моллюски Северной Украины. Киев: Наукова думка, 1970. 128 с.
- Макаренко Д.Е., Звольський С.Т. В битвах Великої Вітчизняної загартовані. Київ: Вид-во НАН України, 1995. 126 с.
- Макаренко Д.Е. Голгофа українських геологів. Київ: Логос, 2007. 188 с.
- Макаренко Д.Е. Історія вивчення палеогенових відкладів УРСР. *Стратиграфія УРСР. Т. 9: Палеоген*: Сябряй В.Т. (ред. тому). Київ: Вид-во АН УРСР, 1963. С. 7–19.
- Макаренко Д.Е. Еоценова епоха і еоценовий відділ. *УРЕ*. 1979а. Т. 4. С. 40.
- Макаренко Д.Е. Кайнозойська ера і група. *УРЕ*. 1979б. Т. 4. С. 509–510.
- Макаренко Д.Е. Крейдовий період. *Географічна енциклопедія України*. Київ: УРЕ ім. М.П. Бажана, 1990а. Т. 2. С. 218.
- Макаренко Д.Е. Крейдова система. *Географічна енциклопедія України*. Київ: УРЕ ім. М.П. Бажана, 1990б. Т. 2. С. 218.
- Макаренко Д.Е. Коштовні перлини. Київ: Рад. шк., 1968. 145 с.
- Макаренко Д.Е. Ласкарев Володимир Дмитрович. *УРЕ*. 1962а. Т. 8. С. 13.
- Макаренко Д.Е. Лемурія. *УРЕ*. 1987а. Т. 2. С. 254.
- Макаренко Д.Е. Лона. *УРЕ*. 1987б. Т. 2. С. 293.
- Макаренко Д.Е. Майкопська серія. *УРЕ*. 1962б. Т. 8. С. 394.
- Макаренко Д.Е. Мезозойська ера і група. *УРЕ*. 1981. Т. 6. С. 436–437.
- Макаренко Д.Е. Микола Омелянович Макаренко. Київ: Наукова думка, 1992. 166 с.
- Макаренко Д.Е. Молюски палеогенових відкладів Криму. Київ: Вид-во АН УРСР, 1961. 111 с.
- Макаренко Д.Е. Нумуліти. *УРЕ*. 1982а. Т. 7. С. 440.
- Макаренко Д.Е. Олігоценова епоха і олігоценний відділ. *УРЕ*. 1982б. Т. 8. С. 7.
- Макаренко Д.Е. Орнітоподи. *УРЕ*. 1982с. Т. 8. С. 63.
- Макаренко Д.Е. Палеогеновий період і палеогенова система. *УРЕ*. 1982д. Т. 8. С. 135.
- Макаренко Д.Е. Палеогеографічна карта. Палеогеновий період. Пізній еоцен. Київський час. Масштаб 1:2 500 000. *Атлас палеогеографічних карт Української і Молдавської РСР (з елементами літофації)*. Бондарчук В.Г. (відп. ред.). Київ: Вид-во АН УРСР, 1960. С. 58.
- Макаренко Д.Е. Палеогеографія території платформеної України в пізньому палеоцені. *Геол. журн.* 1974. Вип. 1 (154). С. 138–143.
- Макаренко Д.Е. Палеогеографія території України в ранньопалеогеновий час. *Геол. журн.* 1973. Вип. 1 (148). С. 104–112.
- Макаренко Д.Е. Палеогенова епоха і палеогеновий відділ. *УРЕ*. 1982і. Т. 8. С. 139.
- Макаренко Д.Е., Решетняк Н.В., Ровнин Л.И., Тихомиров В.В. Репрессированные геологи. Биографические материалы. 2-е изд., испр. и доп., Орлов В.П. (глав. ред.). Москва; СПб.: МСЭ, 1995. 210 с.
- Макаренко Д.Е. Рудисти. *УРЕ*. 1983. Т. 9. С. 506.
- Макаренко Д.Е. Тафономія. *УРЕ*. 1984а. Т. 11. Кн. 1. С. 155.
- Макаренко Д.Е. Тентакуліти. *УРЕ*. 1984б. Т. 11. Кн. 1. С. 196.
- Макаренко Д.Е. Фанерозой. *УРЕ*. 1984с. Т. 1. Кн. 1. С. 539.
- Макаренко Д.Е. Фауна моллюсков нижнетретичных отложений северо-западной части Украинского кристаллического массива. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / Ин-т геол. наук АН УССР. Киев, 1955. 15 с.
- Макаренко Д.Е. Шлях до храму. Археолог, художник, мистецтвознавець Микола Макаренко. Київ: Хрещатик, 2006. 128 с.
- Макаренко Д.Е. Що треба знати про моллюсків. Київ: Рад. шк., 1959. 35 с. (Наук.-попул. літ.).
- Палеонтологи Советского Союза: Справочник. Ленинград: Наука, 1968. 214 с.
- Немков Г.И., Чернова Е.С., Дроздов С.В., Кизевальтер Д.С., Михайлов А.Е., Портная В.Л., Рыжова А.А., Чернов В.И., Гречишников И.А., Густомесов В.А., Золкина А.И., Левицкий Е.С., Макаренко Д.Е., Павлова М.С., Соловьев А.Н. Руководство по учебной геологической практике в Крыму. Т. 1: Методика проведения геологической практики и атлас руководящих форм. Москва: Недра, 1973. 232 с.

Шнюков Е.Ф., Старостенко В.И., Щербак І.Б., Белевцев Р.Я., Говоров И.Н., Гожик П.Ф., Іванік М.М., Іванов Ю.К., Каляев Г.И., Карабович С.В., Клещенко С.А., Коптюх Ю.М., Козак С.А., Лазуренко В.И., Макаренко Д.Е., Маслун Н.В., Митропольский А.Ю., Оверчук В.М., Орловский Г.Н., Русаков О.М., Слипченко В.В., Соболевский Ю.В., Соботович Э.В., Усенко В.П., Францева И.А., Янчук Э.А., Геворкьян В.Х., Чугунный Ю.Г. Геология и металлогения северной и экваториальной частей Индийского океана. Киев: Наукова думка, 1984. 168 с.

Шнюков Є.Ф., Макаренко Д.Є. Геологічні дослідження. *Географічна енциклопедія України*. Київ: УРЕ ім. М.П. Бажана, 1989. Т. 1. С. 255–256.

Шушківський А.І. Дмитро Єлисейович Макаренко (1925–2008). *Енциклопед. вісн. України*. 2015. Ч. 6–7. С. 108–118.

Шушківський А.І. Макаренко Дмитро Єлисейович. *Енциклопедія сучасної України*. Київ: Ін-т енциклопед. досліджень НАН України, 2017. Т. 18. С. 1–2. URL: <https://esu.com.ua/article-60607>

## References

- Aisenverg D.E., Berchenko O.I., Brazhnikova N.E., Vdovenko M.V., Vinnichenko L.V., Vinnichenko L.G., Voronova M.A., Vysochansky I.V., Gorak S.V., Gorbunov V.S., Zosimovich V.Yu., Ivannikov A.V., Kozitskaya R.I., Kononenko L.P., Kotlyar O.E., Kulichenko V.G., Lipnik E.S., Lukin A.E., Makarenko D.E., Makridina L.V., Nemirovskaya T.I., Onufrishin S.V., Permyakov V.V., Poletaev V.I., Savron E.B., Stanislavsky F.A., Sterling B.P., Tkachenko R.Yu., Ustinovsky Yu.B., Khristoforova T.F., Shelkopyas V.N., Shchegolev A.K., Yamnichenko I.M. 1988. Geology and oil and gas potential of the Dnieper-Donets Basin. Stratigraphy. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian).
- All-Union Paleontological Society: Handbook. 1984. Leningrad: Nauka. (in Russian).
- Aristov V.V., Barinov I.V., Belyakov L.P., Volfson F.I., Zonenshain L.P., Kuznetsov S.V., Makarenko D.E., Khisamutdinov N.I., Chesnokov S.V., Shatkov G.A. 1999. Repressed geologists. Third edition, corrected and supplemented. (Chief ed. V.P. Orlov). Moscow-SPb. (in Russian).
- Belyakova H.M., Boykova N.N., Gorbach L.P., Jabarova V.V., Kalyshvych T.G., Makarenko D.E., Martynson H.G., Myronova L.V., Moroz S.A., Paramonova N.P., Pergament M.A., Tolstikova N.V. 1981. Class Bivalvia. Bivalve molluscs. Development and change of molluscs at the turn of the Mesozoic and Cenozoic. Moscow: Nauka, pp. 4–71 (in Russian).
- Bushak S. 2009. A prominent historian of Ukrainian geology. *Geologist of Ukraine*, 1–2, 121–123 (in Ukrainian).
- Didkovsky V.Ya., Zelinskaya V.A., Zernetsky B.F., Zosimovich V.Yu., Ivanik M.M., Kraeva E.Ya., Kulichenko V.G., Makarenko D.E., Maslun N.V., Semenenko V.N. 1979. Biostratigraphic substantiation of the boundaries in the Paleogene and Neogene of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Didkovsky V.Ya., Zernetsky B.F., Zosimovich V.Yu., Kraeva E.Ya., Makarenko D.E., Semenenko V.N. 1971. Some issues of paleogeography and paleobionomy of the Paleogene and Neogene basins of the territory of Ukraine. Ecology of invertebrates of the tertiary seas of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Dikan K.V. 2015. Up to 115th anniversary O.K. Kaptarenko-Chernousova, 105th anniversary I.M. Yamnychenka, 90th anniversary D.Ye. Makarenko and 65-anniversaries Department of stratigraphy and paleontology of Mesozoic deposits of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Geologichnij zhurnal*, 1 (350), 123–126. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2015.1139342> (in Ukrainian).
- Dikan K.V., Makarenko D.E. 1990. Bivalves and gastropods of the Upper Jurassic of the Dnieper-Donets Basin. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Dmytro Yelyseyovych Makarenko: Biobibliographic index. 2008. Kyiv: Lohos (in Ukrainian).
- Geology Shelf of the Ukrainian SSR. Stratigraphy (Shelf and Coast of the Black Sea). (Ed. Yu.V. Teslenko). 1984. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Geology Shelf of the Ukrainian SSR. Tectonics. (Editor-in-Chief V.B. Sollogub). 1987. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Gozhik P.F., Makarenko D.E., Ivanik M.M., Melnik V.I. 1979. Bottom sediments of the tectonically active zone of the Arabian-Indian Ridge. Kyiv: Institute of Geological Sciences of the AS of the UkrSSR. 58 p. (Preprint / AS of the UkrSSR, Institute of Geological Sciences; No. 79–20) (in Russian).
- Gozhyk P.F. 2005. Dmytro Yelyseyovych Makarenko: to the 80th anniversary of his birth. *Geologichnij zhurnal*, 4 (314), 129–130 (in Ukrainian).
- Gozhyk P.F., Maslun N.V., Nosovsky O.Yu. 2009. In memory of Professor Dmytro Yelyseyovych Makarenko. *Geologichnij zhurnal*, 1 (326), 112–113 (in Ukrainian).
- Gozhyk P.F., Maslun N.V., Yefimenko V.I., Zhabina N.M., Ochakovsky V.Yu., Shevchenko T.V., Suprun I.S. 2017. Paleontological Society of Ukraine. Kyiv: IGS of NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Gozhyk P.F., Molyavko V.G. 1996. Dmytro Yelyseyovych Makarenko: to the 70th anniversary of his birth. *Geologichnij zhurnal*, 1–2 (281), 220 (in Ukrainian).
- Institute of Geological Sciences: Handbook. 1986. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Ivanik M.M., Zhabina N.M., Dykan K.V., Shevchuk O.A. 2018. Department of Stratigraphy and Paleontology of Mesozoic Deposits of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine – a Source of Ukrainian Paleontology and Stratigraphy. *Geologichnij zhurnal*, 4 (365), 81–102. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2018.4.148469> (in Ukrainian).
- Leshchuh R. 2005. Dmytro Yelyseyovych Makarenko: to the 80th anniversary of his birth. *Paleontol. Collection*, 37, 136 (in Ukrainian).
- Makarenko D.E. 1970. Early Paleocene molluscs of Northern Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Makarenko D.E. 1976. Gastropods of the Lower Paleocene of Northern Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Makarenko D.E. 1971. Molluscs of the Paleocene deposits of platform Ukraine and their biostratigraphic significance. Doctoral Thesis in Geological and Mineralogical Sciences. Kyiv. Institute of Geological Sciences of the AS Ukrainian SSR. (in Russian).
- Makarenko D.E., Reshetnyak N.V., Rovnin L.I., Tikhomirov V.V. 1995. Repressed geologists. Biographical materials. Second edition, corrected and supplemented. (Chief ed. V.P. Orlov). Moscow-SPb. (in Russian).
- Makarenko D.E. 1955. The mollusc fauna of the Lower Tertiary sediments of the northwestern part of the Ukrainian Crystalline Massif. Candidatel Thesis in Geological and Mineralogical Sciences. Kyiv. Institute of Geological Sciences of the AS Ukrainian SSR (in Russian).
- Makarenko D.E., Zelinskaya V.A. 1982. Molluscs of the middle Eocene of platform Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Makarenko D.E., Zvolisky S.T. 1995. In the battles of the Great Patriotic War, tempered. Kyiv: Publishing House of the National Academy of Sciences of Ukraine (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1979b. Cenozoic era and group. *URE*, 4, 509–510 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1990a. Cretaceous period. Geographical Encyclopedia of Ukraine. Kyiv: Ukrainian Soviet Encyclopedia named after M.P. Bazhan, 2, 218 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1990b. Cretaceous system. Geographical Encyclopedia of Ukraine. Kyiv: Ukrainian Soviet Encyclopedia named after M.P. Bazhan, 2, 218 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1979a. Eocene epoch and Eocene department. *URE*, 4, 40 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 2007. Golgotha of Ukrainian Geologists. Kyiv: Lohos (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1963. History of the Study of Paleogene Deposits of the Ukrainian SSR. *Stratigraphy of the Ukrainian SSR. 9: Paleogene*. (Ed. V.T. Syabryay). Kyiv: Vyd-vo AN URSS, pp. 7–19.
- Makarenko D.Ye. 1962a. Laskarev Volodymyr Dmytrovych. *URE*, 8, 13 (in Ukrainian).

- Makarenko D.Ye. 1987a. Lemuria. *URE*, 2, 254 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1987b. Lona. *URE*, 2, 293 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1962b. Maikop series. *URE*, 8, 394 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1981. Mesozoic era and group. *URE*, 6, 436–437 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1961. Mollusks of Paleocene deposits of Crimea. Kyiv: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1992. Mykola Omelyanovych Makarenko. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1982a. Numulites. *URE*, 7, 440 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1982b. Oligocene epoch and Oligocene division. *URE*, 8, 7 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1982c. Ornithopods. *URE*, 8, 63 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1982d. Paleogene period and Paleogene system. *URE*, 8, 135 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1960. Paleogeographic map. Paleogene period. Late Eocene. Kyiv time. Scale 1:2,500,000. Atlas of paleogeographic maps of the Ukrainian and Moldavian SSR (with elements of lithofacies). (Editor-in-Chief V.G. Bondarchuk). Kyiv: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1974. Paleogeography of the territory of platform Ukraine in the late Paleocene. *Geologičnij žurnal*, 1 (154), 138–143 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1973. Paleogeography of the territory of Ukraine in the early Paleocene time. *Geologičnij žurnal*, 1 (148), 104–112 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1982i. Paleocene epoch and Paleocene department. *URE*, 8, 139 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1984c. Phanerozoic. *URE*, 11, Book One: 539 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1968. Precious pearls. Kyiv: Radyanska Shchola. (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1983. Rudists. *URE*, 9, 506 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1984a. Taphonomy. *URE*, 11, Book One: 155 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1984b. Tentaculites. *URE*, 11, Book One: 196 (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 2006. The way to the Temple. Archaeologist, Artist, Art Critic Mykola Makarenko. Kyiv: Khreshchatyk. (in Ukrainian).
- Makarenko D.Ye. 1959. What you need to know about molluscs. Kyiv: Radyanska Shchola. (Scientific and popular literature) (in Ukrainian).
- Maydanovich I.A., Makarenko D.E. 1988. Geology and genesis of amber deposits of Ukrainian Polesie. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian).
- Nemkov G.I., Chernova E.S., Drozdov S.V., Kizewalter D.S., Mikhailov A.E., Portnaya V.L., Ryzhova A.A., Chernov V.I., Grechishnikova I.A., Gustomesov V.A., Zolkina A.I., Levitsky E.S., Makarenko D.E., Pavlova M.S., Soloviev A.N. 1973. Guide to educational geological practice in Crimea. Vol. 1: Methodology of geological practice and atlas of guiding forms. Moscow: Nedra. (in Russian).
- Paleontologists of the Soviet Union: Directory. 1968. Leningrad: Nauka. (in Russian).
- Shnyukov Ye.F., Makarenko D.Ye. 1989. Geological studies. Geographical encyclopedia of Ukraine. Kyiv: Ukrainian Soviet Encyclopedia named after M.P. Bazhan, 1, pp. 255–256 (in Ukrainian).
- Shnyukov E.F., Starostenko V.I., Shcherbakov I.B., Belevtsev R.Ya., Govorov I.N., Gozhik P.F., Ivanik M.M., Ivanov Yu.K., Kalyaev G.I., Karabovich S.V., Kleshchenko S.A., Koptyukh Yu.M., Kozak S.A., Lazurenko V.I., Makarenko D.E., Maslun N.V., Mitropolsky A.Yu., Overchuk V.M., Orlovsky G.N., Rusakov O.M., Slipchenko V.V., Sobolevsky Yu.V., Sobotovich E.V., Usenko V.P., Frantseva I.A., Yanchuk E.A., Gevorkyan V.Kh., Chugunny Yu.G. 1984. Geology and metallogeny of the northern and equatorial parts of the Indian Ocean. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian).
- Shushkivsky A.I. 2015. Dmytro Yelyseyovych Makarenko (1925–2008). *Encyclopedic Bulletin of Ukraine*, 6–7, 108–118 (in Ukrainian).
- Shushkivsky A.I. 2017. Makarenko Dmytro Yelyseyovych. Encyclopedia of Modern Ukraine. Kyiv: Institute of Encyclopedic Research of the NAS of Ukraine, 18, pp. 1–2. Retrieved from: <https://esu.com.ua/article-60607> (in Ukrainian).
- Zernetskyi B.F. 2009. Expert in Cenozoic Mollusks (in memory of Professor Dmytro Yelyseyovych Makarenko). Fossil Fauna and Flora of Ukraine: Paleontological and Stratigraphic Aspects. *Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Kyiv, pp. 416–418 (in Ukrainian).
- Zernetskyi B.F. 2009. In Memory of Professor Dmytro Yelyseyovych Makarenko. *Geologist of Ukraine*, 1–2, 175–176 (in Ukrainian).
- Zernetskyi B., Leshchuh R. 2008. Outstanding paleontologist of Ukraine D.Ye. Makarenko (in memory of Professor Dmytro Yelyseyovych Makarenko). *Paleontol. Collection*, 40, 143–145 (in Ukrainian).
- Zernetskyi B.F., Zelinskay V.A., Blank M.Ya., Zosimovich V.Yu., Ivanik M.M., Kraeva E.Ya., Makarenko D.E., Maslun N.V., Stotland A.B. 1987. Stratigraphic scheme of Paleogene deposits of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian).

## ШАНОВНІ АВТОРИ!

Просимо при підготовці до друку рукописів враховувати вимоги, викладені в «Керівництві для авторів» нашого журналу.

<http://geojournal.igs-nas.org.ua/about/submissions#authorGuidelines>

### Особливо звертаємо Вашу увагу на таке:

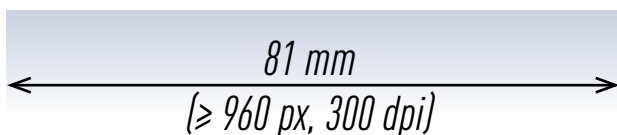
**Вимоги щодо надання рисунків до статей.** Див. розділ «Ілюстрації» «Керівництва для авторів».

- Ідеальний варіант для рисунків – векторні зображення.
- Щодо графіків та діаграм – також у пріоритеті є векторні файли.
- Якщо є проблеми із збереженням у векторному форматі, а діаграма створена в ексель – дизайнер журналу може прийняти діаграму в ексель файлі.
- Для діаграм, зроблених в Microsoft Excel, потрібно надати оригінальний файл XLS(X) або діаграму, експортовану з Excel в форматі SVG (для цього треба клікнути правою кнопкою миші на діаграму -> Зберегти рисунок як -> .svg)»
- Для друку необхідно якісний файл розміром по ширині не менше 1/2 ширини сторінки (журнальна колонка).
- Рисунки можуть бути на ширину колонки (1/2 ширини сторінки) **(a)**, 3/4 ширини **(b)** та на всю ширину сторінки **(c)**, для растрових форматів – не менше 300 dpi. Мінімальний розмір підпису – 8 пт (шрифт Arial).

- Якщо автор надає рисунок розміром на всю ширину сторінки, то мінімальний надпис на цих рисунках повинен відповідати розміру шрифту від 8 пт до 11 пт **(d)**.
- На всіх рисунках однієї статті шрифти та їх розміри мають бути уніфікованими.
- Звертати увагу на фізичний розмір поданого рисунка, щоб не допустити занадто малого розміру ілюстрації в друкованому вигляді.
- Візуаліція вимог до рисунків. У прикладі розміри наведено і у міліметрах, і у пікселях.

**Оформлення посилань** необхідно виконувати згідно з вимогами «Керівництва для авторів», розділ «Приклади бібліографічних описів». Відповідно до вимог Положення про використання об'єктів права інтелектуальної власності в НАН України у списку літератури (переліку посилань) для наукових статей зазначають автора(ів) твору, назву статті, назву журналу, рік видання, номер журналу, сторінки, doi або, якщо doi відсутнє, – гіперпосилання на місце знаходження статті. В Україні використання DOI у науковій періодиці стало обов'язковим згідно п. 6 Порядку формування Переліку наукових фахових видань України (Наказ Міністерства освіти і науки України № 32 від 15.01.2018 р.).

a)

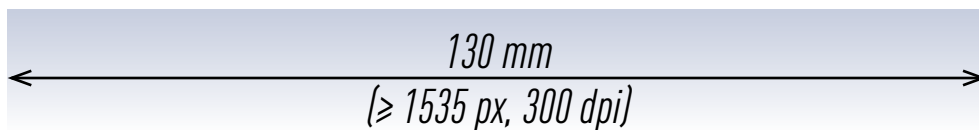


d)

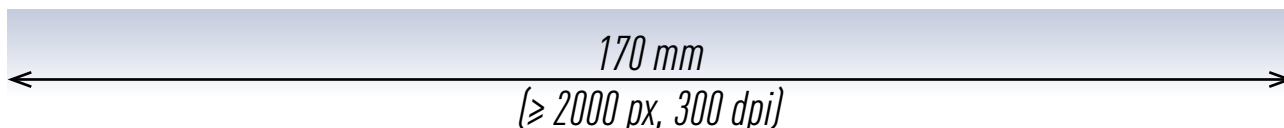
Шрифт для підписів Arial Regular 8 пт – мінімальний розмір

Шрифт для підписів Arial Regular 11 пт – максимальний розмір

b)



c)



# 100 років



## Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine



**MAY 2026 MARKS THE 100<sup>TH</sup> ANNIVERSARY OF THE FOUNDING OF THE INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES OF THE NAS OF UKRAINE – THE OLDEST SCIENTIFIC CENTER IN THE FIELD OF GEOLOGY IN UKRAINE.**

- The Institute began as the Ukrainian Research Geological Institute of the People's Commissariat for Education of the Ukrainian SSR, formed from the geological departments of the Academy of Sciences and the People's Commissariat for Education.
- Throughout its long history, the Institute has established several key research areas and academic schools, including general geology and geotectonics, palaeontology and stratigraphy, hydrogeology, engineering and environmental geology, mineral geology, lithology, sedimentology, and marine and ocean geology.
- These scientific schools were founded and developed by renowned geologists and scientists P.A. Tutkovsky, M.I. Bezborodko, E.S. Burkser, V.G. Bondarchuk, V.I. Luchitsky, K.I. Makov, M.G. Svitalsky, V.B. Porfiriev, M.P. Balukhovskiy, A.Ye. Babynets, Ye.F. Shniukov, P.F. Gozhyk, V.M. Shestopalov, V.I. Lialko, and by many others.



- The Institute played a significant role in the development of new scientific fields, the organization of geological research, and the preparation of scientific specialists. Practically all scientific institutions of a geological profile within the National Academy of Sciences of Ukraine were established on the basis of its departments.
- The Institute of Geological Sciences continues to contribute substantially to the development of fundamental geological issues, plays a key role in providing scientific support for modernization and creation of stratigraphic schemes of the new generation, correlation of stratigraphic units with the International Stratigraphic Chart, development of relevant issues concerning Ukraine's mineral resources sector, the country's resource security, establishing the scientific basis for the preservation and improvement of the environment, assessment of the impact of war on the geological environment, and the implementation of modern monitoring methodologies and strategies for the restoration of the geological environment to support Ukraine's economic development, among other areas.

- **The Institute serves as the base institution for public scientific associations:** the National Stratigraphic Committee of Ukraine, the Paleontological Society of Ukraine, the Ukrainian Lithological Committee, and Scientific Councils on "Geological Problems of Isolating Radioactive and Other Hazardous Wastes in the Subsurface" and "The Origin of Oil and Gas."

- **The preparation of highly qualified researchers** is carried out through postgraduate and doctoral programs and the work of a specialized academic council for granting the degree of Doctor of Geological Sciences.

- **The Institute is the founder and publisher** of the "Geological Journal" (indexed in the SCOPUS scientometric database) and the "Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine."

- **International cooperation** is maintained with scientific institutions of Poland, Germany, France, Sweden, Spain, Croatia, Slovakia, and other European countries. The Institute participates in projects within a consortium with geological organizations of European Union countries under the Horizon Europe Program, and with the Geological Survey of Finland under the Horizon 2020 Program. Researchers are involved in cooperation with the International Atomic Energy Agency (IAEA), the Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE), and others.

- **To mark the 100<sup>th</sup> anniversary of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, a jubilee scientific conference is planned to take place at the Institute from 19 to 21 May 2026. The conference will cover the following topics:**

- › Geological chronicle: stratigraphy, paleontology, sedimentology.
- › Mineral resources: formation, prospects, global challenges.
- › Resilience and safety of the geological environment during wartime: groundwater, technogenic geological systems, and restoration.
- › Earth System Science: innovative methods and interdisciplinary approaches.

**WELCOME TO PARTICIPATE IN THE CONFERENCE AND TO COLLABORATE!**

**1926–2026  
IGS NASU**

**INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES  
OF THE NAS OF UKRAINE**

**55-b O. Honchara St., Kyiv**

<http://www.igs-nas.org.ua>

<https://www.facebook.com/profile.php?id=100067872909888>

## **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.

→ The journal is indexed / abstracted:

ELSEVIER Scopus; CrossRef; OpenAIRE; Index Copernicus; Google Scholar; WorldCat; Vernadsky National Library of Ukraine; Scientific electronic library of periodicals of the National Academy of Sciences of Ukraine; BASE.

→ The journal is listed as a scientific professional edition of Ukraine (category “B”), specialties 04 – “Geological Sciences” and 103 – “Earth Sciences” (Ministry of Education and Science of Ukraine 02.07.2020 No. 886).



9 786177 228560