ВІСНИК
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ISSN 1728-2713 (Print), ISSN 2079-9063 (Online)

ГЕОЛОГІЯ **4(107)/2024**

Засновано 1958 року

УДК 504+550+551+552+624
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Адреса редколегії	**ННІ "Інститут геології"** **вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022** **☎ (38044) 521 33 38** **e-mail: geology.bulletin@knu.ua; geolvisnyk@ukr.net** **web: https://geology.bulletin.knu.ua**
Затверджено	**вченою радою ННІ "Інститут геології"** **20.12.24 (протокол № 7)**
Зареєстровано	**Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення** **Рішення № 1089 від 28.03.24** **Ідентифікатор друкованого медіа: R30-03800**
Атестовано	**Міністерством освіти і науки України (категорія А)** **Наказ № 1412 від 18.12.18**
Індексування	**Scopus, Web of Science (квартиль 4, імпакт фактор 0.2), Research Bib, Google Scholar, Crossref**
Засновник та видавець	**Київський національний університет імені Тараса Шевченка** **Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"** **Свідоцтво про внесення до Державного реєстру** **ДК № 1103 від 31.10.02**
Адреса видавця	**ВПЦ "Київський університет"** **б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601** **☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28** **e-mail: vpc@knu.ua**

BULLETIN

TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

ISSN 1728-2713 (Print), ISSN 2079-9063 (Online)

GEOLOGY 4(107)/2024

Established in 1958

UDC 504+550+551+552+624
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

Address	**USI "Institute of Geology"** **90, Vasylkivska Str., Kyiv, 03022** **☎ (38044) 521 33 38** **e-mail: geology.bulletin@knu.ua, geolvisnyk@ukr.net** **web: https://geology.bulletin.knu.ua**
Approved by	**the Academic Council of the USI "Institute of Geology"** **20.12.24 (protocol № 7)**
Registered by	**the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine** **Decision № 1089 of 28.03.24** **Identifier of printed media: R30-03800**
Certified by	**the Ministry of Education and Science of Ukraine (category A)** **Order № 1412 dated 18.12.18**
Indexing	**Scopus, Web of Science (Quartile 4, Impact Factor 0.2), Research Bib, Google Scholar, Crossref**
Founded and published	**Taras Shevchenko National University of Kyiv** **Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University"** **Certificate of entry into the State Register** **ДК № 1103 dated 10.31.02**
Address	**PPC "Kyiv University"** **14, Taras Shevchenko blvd., Kyiv, 01601** **☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28** **e-mail: vpc@knu.ua**

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

ГЕОФІЗИКА

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

ГЕОІНФОРМАТИКА

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

GEOPHYSICS

MINERAL RESOURCES

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

GEOINFORMATICS

UDC 551.435.627
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.01

Olena IVANIK[1,2], Dr. Sci. (Geol.)
ORCID ID: 0000-0002-8782-4883
e-mail: ivanik@knu.ua

Jérôme LAVÉ[2], Dr. Sci. (Geol.)
ORCID ID: 0000-0001-8358-2402
e-mail: jerome.lave@univ-lorraine.fr

Kateryna HADIATSKA[1], PhD (Geol.)
ORCID ID: 0000-0003-1334-506X
e-mail: katkravchuk@gmail.com

Dmytro KRAVCHENKO[1], PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-6312-819X
e-mail: dmytro.kravchenko@knu.ua

Eduard PETRUSHENKO[1], Master's Student
ORCID ID: 0009-0001-6699-2722
e-mail: edik.petrushenko322@gmail.com

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[2]CRPG, CNRS, Університет Лотарингії, Франція

SUSCEPTIBILITY MODELLING OF LANDSLIDES IN CENTRAL NEPAL

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

Background. *Landslide processes in the Himalayas represent a major hazard threatening both humans lives and the socio-economic development of the region. The main goal of the present study is to examine the main factors influencing landslides in Central Nepal, to understand their relative importance and connections, and demonstrate the potential of the integrated technique for the assessment of landslide hazards at the regional scale.*

Methods. *The workflow used in this study consists of the following steps: (1) collection of the data for analysis (numerical topographies, remote sensing data, geological data, inventory of landslides); (2) identification of the main causes of landslides, determination of input parameters for modelling; (3) lineament extraction by using manual and automated approaches; and (4) susceptibility mapping and spatial modelling of landslides.*

Results. *Based on the overlay analysis of geological and geomorphological data, the susceptibility modelling of landslides in Central Nepal helps to identify the landslide-prone areas (high to low). The analysis confirms the essential role of lineaments in the landslide formation and their relation with tectonic and erosion processes. Therefore, in the regional classification of landslides in the Central Nepal it is necessary to add the landslides associated with weak zones of various nature and orientations.*

Conclusions. *The susceptibility modeling and landslide forecasting at the regional level are the main stage of the landslide risk evaluating and management. The results concern the general impact of geological-geomorphological and landscape factors on the formation of landslide phenomena in Central Nepal. Carrying out an analysis of landslides and studying their dynamics and regime is only possible with detailed studies and identifying the priority of the influence of each factor on the landslide formation. This study also aims to provide valuable insights for disaster preparedness, risk reduction, and sustainable land use practices in the region.*

Keywords: *Nepal, landslide hazard, susceptibility, mapping.*

Background

Landslide processes in the Himalayas represent a major hazard threatening both human lives and the socio-economic development of the region located in the central Himalaya. Nepal is particularly vulnerable to landslide hazards: all its mountainous districts are affected. Nepal contribute 10 % of all rainfall-triggered landslide events to the Earth global dataset. The analysis of different databases (Petley et al., 2007; Froude, & Petley, 2018) suggest that there is a high level of variability in the occurrence of landslides from year to year in Himalaya, but that the overall trend is upward. This increase in landslide occurrences amplifies the importance of research and measures to mitigate these natural disasters. The complexity of factors influencing landslides in this region range from geological and topographical features to climate conditions.

Landslides hazard assessment and landslide management are based on various approaches and methodology among which the regional forecasting of landslides and the determination of the main causes and their possible associations is of great importance (Roy, & Saha, 2019; Biswakarma et al., 2020). Regional forecasts imply special zoning of the territory, which characterizes the spread of landslides, the conditions for their occurrence and activation, and determines the probability of occurrence within certain territories. The susceptibility modelling of landslides helps to identify the landslide-prone areas (high to low). This enables communities to implement mitigation measures across the landslide-induced zones (Dhungana et al., 2023). In the central Himalaya, many studies have attempted to document landslide susceptibility using different approaches, most of them based on multi-criteria zoning and statistical approaches. Four distinct approaches were applied in the Indrawati watershed, a high mountain area of Central Nepal: frequency ratio, logistic regression, artificial neural network, and support vector machine. Landslide susceptibility maps are prepared on the basis of available digital data of topography, geology, land-use and hydrology (Kayastha, Dhital, & De Smedt, 2013; Gautam et al., 2021). Regmi et al. (2014) have investigated the application of the frequency ratio (FR), statistical index (SI), and weights-of-evidence (WoE) approaches for landslide susceptibility mapping within the Lesser Himalaya and Siwalik zones of Central Nepal. With a success rate of 76.8 % and predictive accuracy of 75.4 %, the FR model performs better than the WoE and SI models. In most cases the validation of landslide susceptibility maps is

carried out using receiver operating characteristic (ROC) curves (Devkota et al., 2013). It is important to note that comprehensive understanding of the primary factors influencing landslides and their intricate interrelations is of paramount importance for assessing landslide susceptibility and predicting future occurrences. Investigating the relationships among the factors is essential for developing accurate models that can assess landslide susceptibility.

The main goal of the present studies is to examine the main factors influencing landslides, to understand their combinations and priority, and finally to demonstrate the potential of the integrated technique for the assessment of the landslide hazards at the regional scale within the mountain areas. This study also aims to provide valuable insights for disaster preparedness, risk reduction, and sustainable land use practices in the region.

Geological settings. The Nepal Himalayas is located in the central part of the Himalayan arc. The range is a consequence of the collision between Indian and Eurasian plates during the Cenozoic and is bounded by Indus Tsangpo Suture Zone (ITSZ) to the north and the Ganga basin to the south. The Nepal Himalayas display the highest peaks on Earth. They are characterized by steep slopes, rugged relief, and deep valleys, and one of the most tectonically active continental regions in the world (Adhikari, & Ojha, 2021).

This region is marked by a gradient of heavy rainfall increasing from south to north with intense monsoon precipitation peaking at 4 m/y along the southern flank of the High range (Putkonen, 2004). This area presents steeper slopes, active microseismic activity (Ni, & Barazangi, 1984; Pandey et al., 1995), with strong ground shaking events by major earthquakes like during the Gorkha earthquake (Mw ~7.8, 25/04/2015). This topographic, climatic and seismic setting induces some of the highest regional erosion rates in the Himalayas (Lavé &Avouac, 2001), particularly through intense monsoon-induced and co-seismic landsliding (Petley et al., 2007; Morin et al., 2018; Roback et al., 2018; Marc et al., 2019; Jones et al., 2021). The landslides affect all the geologic units of the central Himalaya. This geology is traditionally divided into four main E–W trending geological units (Colchen, Le Fort, & Pécher, 1986), including from North to South: 1 – the Tethyan Sedimentary Series (TSS: medium to low-grade detrital and carbonate metasediments of Paleozoic to Eocene age); 2 – the High Himalayan Crystalline (HHC: high-grade metamorphic gneisses and migmatites; both formations are intruded by Miocene leucogranites); 3 – the Lesser Himalayan formations (LH: metamorphosed Precambrian to Palaeozoic metasediments of the Indian craton); 4 – the Siwaliks corresponding to the Neogene foreland basin deposits of the Ganga plain, exhumed by Late Cenozoic thin skin tectonics. At the longitude of Kathmandu area, the southern prolongation of the High Himalayan Crystalline units is expressed by a klippen (the so-called Kathmandu klippen) that overrides the Lesser Himalayan units and which is made of high grade methamophosed units at its base to unmetamorphosed sediments at its top.

These geologic units are bounded by major thrusts: the Main Central Thrust (MCT) that overthrusted HHC units on top of LH units, the Main Boundary Thrust (MBT) that overthrusted LH units on top of Siwaliks sedimentary units, and the Main Frontal Thrust (MFT), that marks the most frontal topographic expression of the Himalayan wedge north of the modern Ganga plain. Most of the units present large scale folds, secondary folds as well as internal secondary faulting and fracturing mostly due to Himalayan active shortening over at least 20 Ma. Most of them are usually underlined by a geomorphic signature like break in slopes, linear valleys, or lineaments.

These tectonic features are usually associated to larger internal deformation and fracturing, which is presumed to have a direct impact on landslide susceptibility and on landscape erodibility. Structural elements as faults, folds and lithological boundaries and other structural weakness zones have therefore an imprint on erosional forms and landscape, that can be expressed in many cases by lineament features (Bhattarai, 1984).

Methods

Landslide risk assessment on a regional scale requires a special classification of the area in order to characterize landslide distribution, triggering factors and occurrence probabilities.

The workflow used in this study consists of the following steps:

1) collection of the data for analysis, – e.g. SRTM/DSM numerical topographies, Landsat images, geological data, inventory of landslides. For the Central Nepal recently compiled 30-year mass-wasting inventory (Jones et al., 2021) has been used. This database includes mass-wasting over an area of ~42,000 km^2 extending over central and eastern Nepal, between 1988 and 2018. Of the 12,920 moderate to large (>1000 m^2) landslides mapped, 10,138 were new failures and 2782 reactivations or remobilisations of previous failures (Fig. 1). The inventory does not include co-seismic or anthropogenic mass movements, but includes rainfall-induced landslides as well as reactivations/remobilisation during monsoon of co-seismic mass wasting (Jones et al., 2021);

2) identification of the main preparatory factors of landslides, determination of input parameters for modelling from existing geological and geomorphological data;

3) lineament extraction by using manual and automated approaches (ArcGIS and RockWorks17), and subsequent comparison of the results (Poliakovska et al., 2022);

4) susceptibility mapping and spatial modelling of landslides using the weighted overlay method.

To determine in step 3 the impact of the structural-tectonic factor on the formation of landslides, detailed studies of lineaments were carried out and the priority influence of tectonic factor on the reactivation/remobilization of landslide phenomena was determined. The lineament features were mapped using remote sensing and topography data. Such method is applied for different geological research (Bhattarai, 1984; Kassou et al., 2012; Thapa et al., 2023). The workflow used for the lineaments analysis is composed of four main steps (Poliakovska et al., 2022): (i) selection of the most suitable data for analysis, – e.g. SRTM/DEM/Landsat images; (ii) data processing and enhancements; (iii) lineament extraction by using the manual and automated approaches and their further comparison. (iv) comparison of the final map with available geological and tectonic data and geospatial analysis (density, direction, intersection length, and orientation analysis). For lineament analysis of the Central Nepal the LANDSAT 8 images were used. A specific geomodelling software packages were applied for the analysis: RockWorks17, ArcGIS, and Stereonet. Remote sensing and GIS techniques enable the process of analyzing and interpreting the topography data.

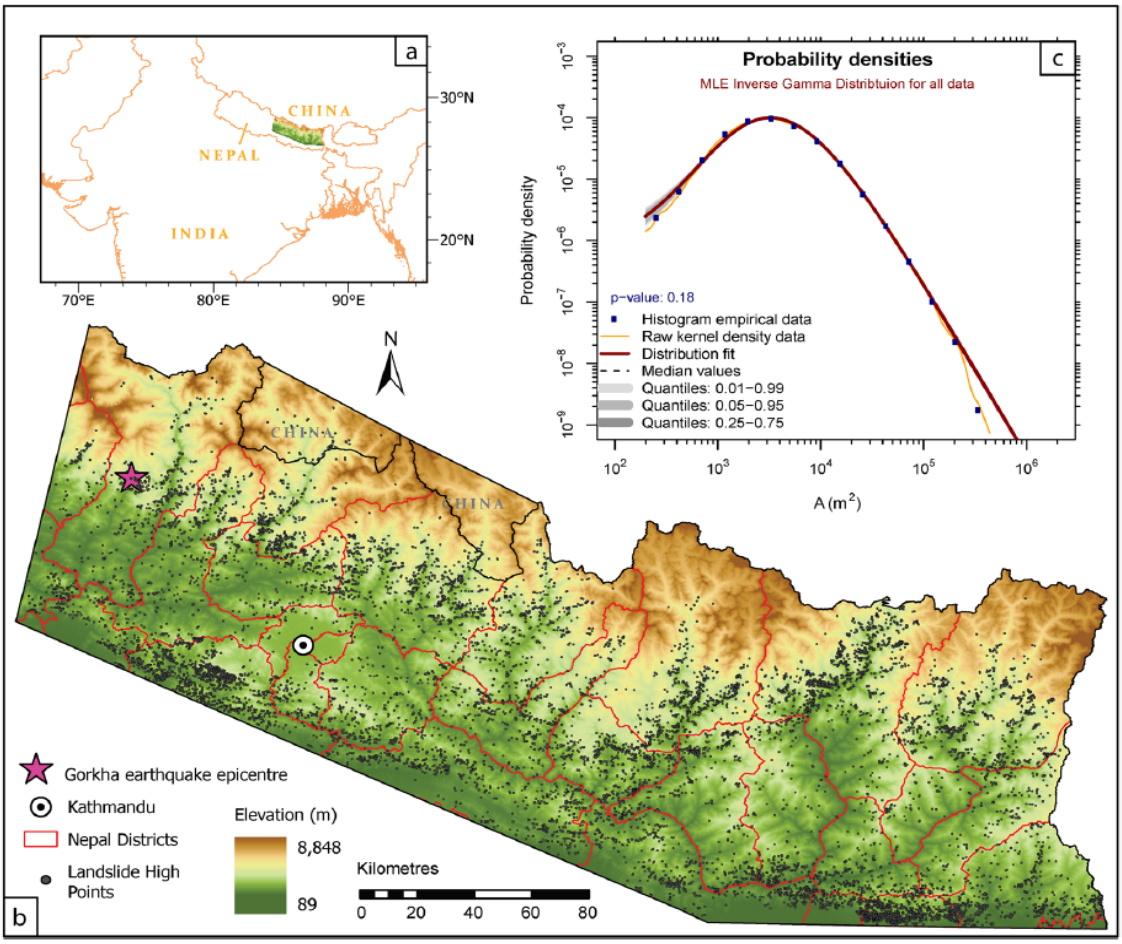


Fig. 1. (a) Regional location of the study region. (b) The location of the 12,838 mapped landslide points used within this study. Kathmandu and the 2015 Gorkha earthquake epicenter are represented by a circle and a pink star respectively. (c) The inverse-gamma distribution fitted to the probability density function of landslide area for all mapped landslides (reproduced from Jones et al., 2021)

Results

Analysis of the factors favoring the occurrence of landslides and landslide susceptibility mapping. An analysis of the factors favoring the occurrence of landslides is performed on the basis of existing geological and remote sensing data. Various data can be involved in the overlay analysis, which determine the priority factors of mass movements and their possible combinations. This method allows to take into account simultaneously the different factors to be considered in order to obtain spatial information and to implement a multi-factor model for a comprehensive landslide hazard assessment.

As a result of geological and geomorphological studies and analysis of mass movements, a complex relationship between geomorphological and geological factors in the formation of these hazardous processes has been established for the study area.

In Central Nepal topographic characteristics are one of the most important criterion and prognostic indicator for the formation of landslides. The main factors that traduce the impact of the topography are: absolute elevation of the landslides, slope and aspect of the hills (Regmi et al., 2014; Petley et al., 2007). To study the relief parameters USGS DEM model representing 3D elevation data has been used. The vast majority of landslides are confined to steep slopes, the degree of which varies from 36 to 89 (Fig. 2).

The lithology appears also to control the occurrence of the landslide phenomena. For spatial analysis of existing landslides, the large-scale geological map of the Central Nepal was used (Dhital, 2015).

Geographically, the majority of landslide processes are confined to the Himal group (two mica gneisses, granitic gneisses, banded gneisses, kyanite bearing gneisses) and Ranimatta formation (phyllites, grillstones with conglomerates and massive quartzites). A large number of landslides correspond to the rocks of the Upper Lesser Himalaya group represented by quartzites interbedded with phyllites, carbonaceous slates and green shales, calcareous quartzites and quarzitic limestones, and dark grey slates (Fig. 3). Based on the results of the overlay analysis, the location of landslides within a certain polygon of the specified vector layers was identified and a statistical calculation of the occurrence of landslides in a specific polygon was carried out by combining the attribute tables of landslides and the specified layers. A procedure was carried out to rank the territory by the number of landslides within each polygon.

To determine the impact of the structural-tectonic factor on the formation of landslides, the detailed analysis of lineaments was carried out and the priority influence of tectonic factor on the reactivation/remobilization of landslide phenomena was determined. The lineament features were mapped all over the mountainous areas including the Siwaliks (Fig. 4a). The High Himalaya and the Mahabarat range display a higher density of lineaments than the Lesser Himalaya and the Siwalik belt.

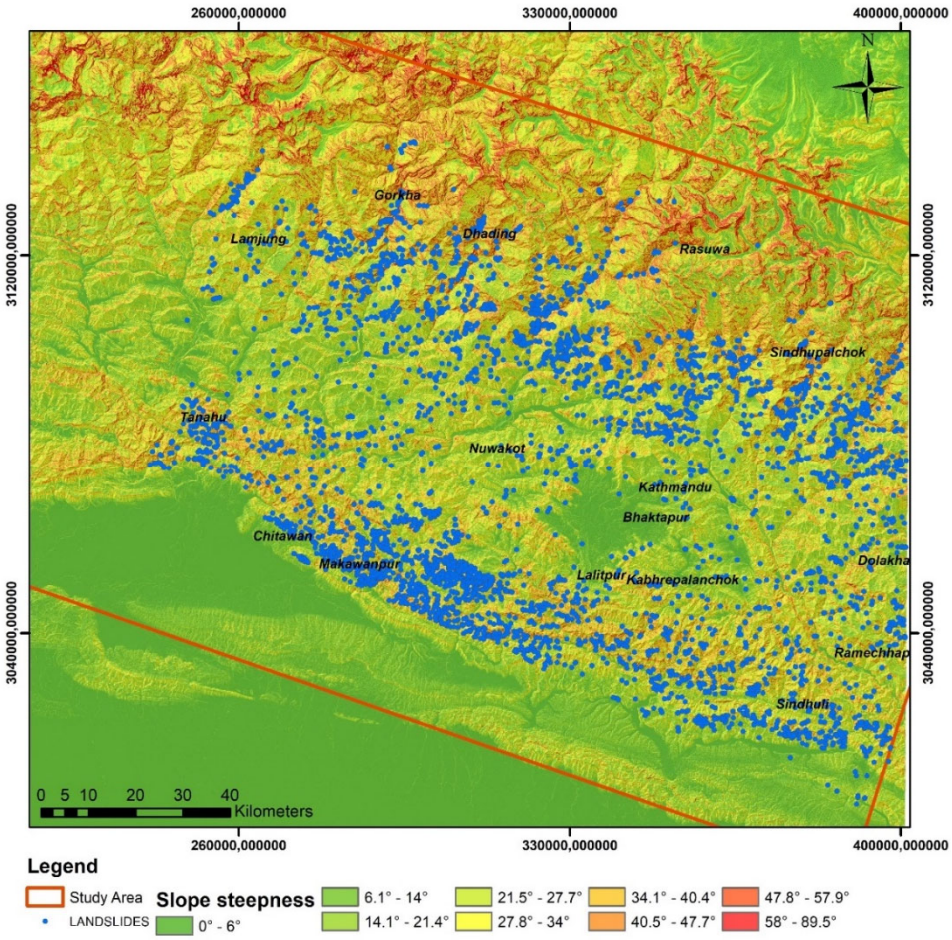


Fig. 2. Distribution of the monsoon-induced landslides (Jones et al., 2021) superimposed on the slope map of Central Nepal

The corresponding determination of the influence of lineaments of different nature on the formation of landslides is shown on the Fig. 4. A significant number of landslides are localized within a distance of 0 – 1000 m from lineaments (Fig. 4b and 5).

The spatial analysis confirms (Fig. 4) the essential role of lineaments in the landslide formation and the relation between tectonic heritage and pre-conditioning factors for landslides. Certain combinations of geological and tectonic conditions can result in a complex interplay of erosion processes and tectonic zones, which essentially affects the dynamics and morphology of landslides. Within tectonized units associated to active or formerly active faults, rheologic weaknesses favour the manifestation of landslide phenomena. The constructed map of the distances of the landslides in relation to the lineaments became the basis for creating a raster model of the study area with ranking of zones, and where the distances to the lineaments are reflected (four classes characterizing these distances were identified, respectively).

Thus, based on cartographic modeling, a comprehensive analysis of the factors for the formation of landslide processes was carried out. Each above described factor was ranked according to its degree of correlation with the density of recent landslides. The objects of each layer (factor) were classified creating a unified scale for all classes (ranking from 1 to 4) to assess their impact on the landslide hazard. In order to determine the impact of each factor on the formation of landslides, calculations of weighting coefficients (informativeness coefficients) were performed. All characterized factors are combined to create a common integrated hazard map. It should be noted that the assignment of weighting coefficients at the analysis stage required some clarifications and adjustments. This is dictated by the need for a step-by-step grouping of factors and the use of the results of expert assessment, taking into account data from analytical studies. The integrated landslide susceptibility map (Fig. 5) was created by the method of overlay analysis, which makes it possible to simultaneously take into account the considered factors, obtain a new spatial information and the corresponding implementation of a model for a comprehensive assessment of landslide hazard in the region. A landslide susceptibility map depicts areas that have the potential for landsliding. These areas are determined by correlating some of the principal factors that contribute to landsliding with the past distribution of landslides. Susceptibility measures the degree to which a terrain can be affected by future slope movements (Shahabi, & Hashim, 2015). In other words, it is an estimate of "where" landslides are likely to occur. In mathematical language, susceptibility can be defined as the probability of spatial occurrence of slope failures, given a set of geo-environmental conditions. Susceptibility does not consider the size e.g., the length, width, depth, area or volume of the landslides, but susceptibility assessments can be prepared for different-sized landslides.

These maps indicate only the relative stability of slopes; they do not make absolute predictions.

The results concern the general impact of geological-geomorphological and landscape factors on the formation of landslide phenomena in Central Nepal. Carrying out an analysis of landslides and studying their dynamics and regime is only possible with detailed studies and identifying

the priority of the influence of each factor on the landslide formation. The significance of dynamic factors can radically change their combinations and the corresponding weight of each in the process of landslide formation. It should be noted that the analysis of landslide formation factors was carried out to study the natural factors of the landslide phenomena. The impact of anthropogenic factors, which are usually unpredictable and cannot be considered as forecasting and reference criteria, introduces a variable component into the overall analysis process, the consideration of which in each specific case requires additional research and a corresponding change in the complex landslide hazard model.

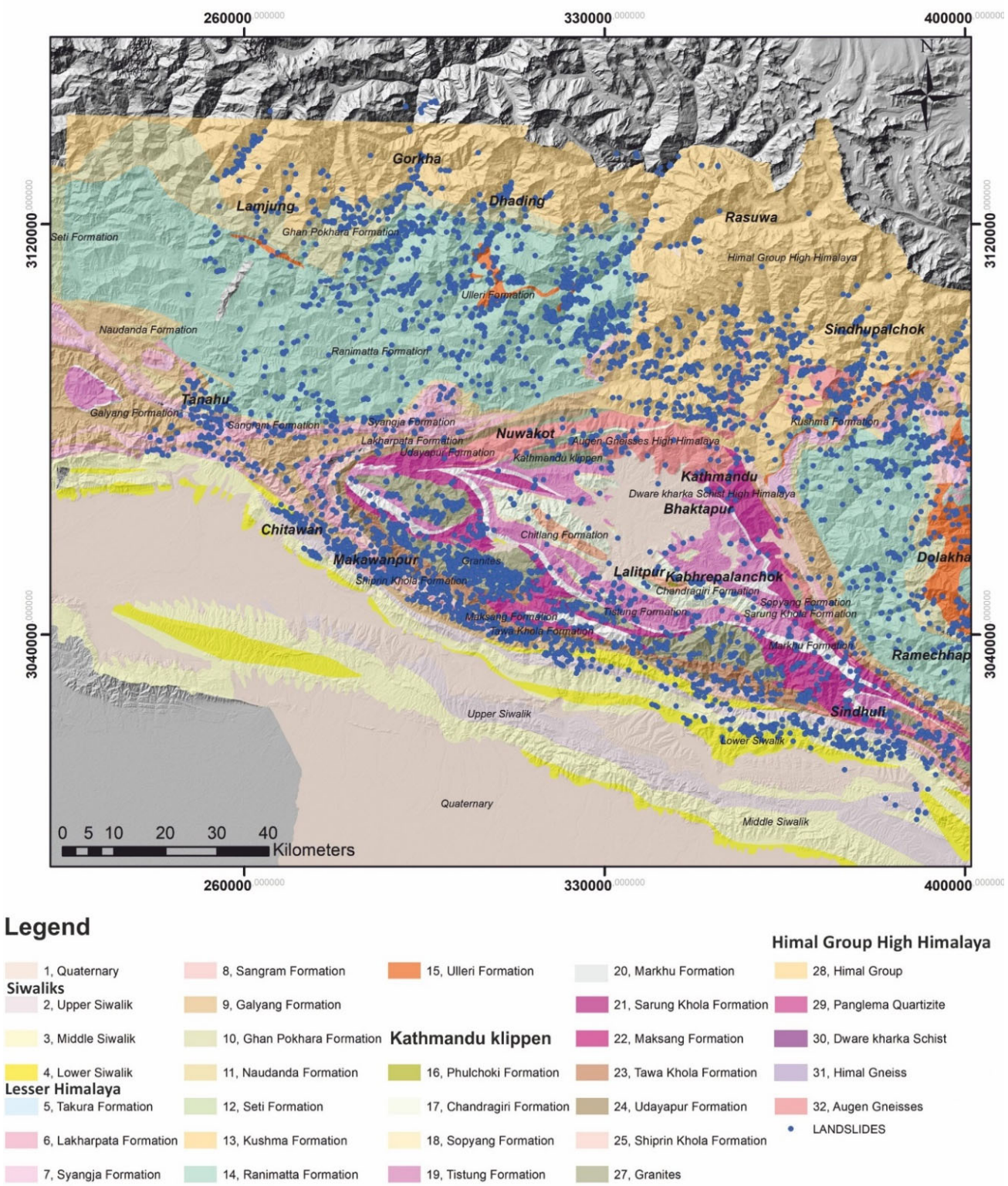


Fig. 3 Distribution of the monsoon-induced landslides (Jones et al., 2021) superimposed on the geologic map of Central Nepal (Department of Mines and Geology of Nepal)

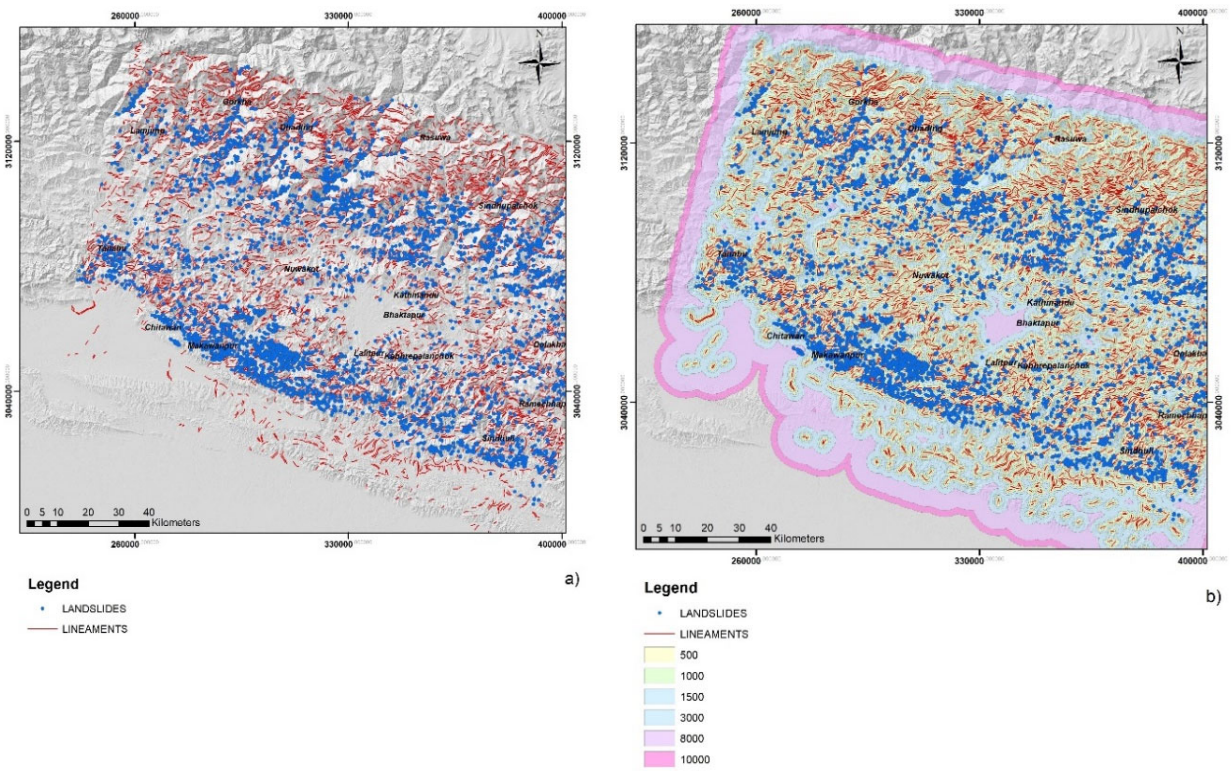


Fig. 4. Monsoon induced landslides superimposed on the maps of lineaments (a) and of distance to lineaments (b) in Central Nepal

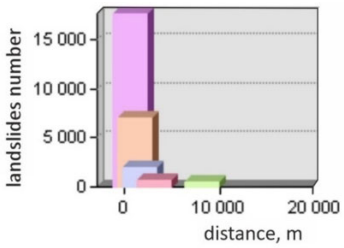


Fig. 5. Graph of number the landslides and their distributions within zones of distance to lineaments

Discussions and conclusions

The article's emphasis on susceptibility modeling as a preliminary step in predicting landslides is an important perspective in geology and natural disaster risk assessment. Susceptibility modeling indeed plays a crucial role in identifying areas where landslides are likely to occur, and it provides a valuable tool for prioritizing areas for further investigation and mitigation efforts. However, it's essential to recognize that susceptibility modeling has limitations and should be complemented with more detailed, site-specific information. One key point made in the article is that susceptibility modeling can effectively highlight regions with a high risk of landslides. This is particularly useful for large-scale planning, such as zoning regulations, infrastructure development, and disaster preparedness. Identifying these susceptible areas at a broad scale allows for proactive measures to be taken, such as land use planning, risk assessment, and the implementation of early warning systems (Sim, Lee, & Wong, 2022).

Nonetheless, the article correctly points out that susceptibility modeling alone cannot provide a complete understanding of landslide dynamics. To comprehensively assess the risk and predict the behavior of landslides, it is necessary to delve into the local geological and geotechnical conditions. This involves conducting in-depth geological research to understand the specific characteristics of the soil and rocks, the geological structure of the slopes, groundwater conditions, and other factors that influence slope stability. In essence, while susceptibility modeling helps to identify potential landslide-prone areas on a regional level, it cannot replace the importance of detailed, site-specific geological research for a comprehensive assessment. Only through local-scale investigations we can understand the unique factors that contribute to landslide formation and develop effective mitigation strategies. This comprehensive approach is crucial for minimizing the potential consequences of landslides, including loss of life and property damage.

Susceptibility modeling is a valuable tool in landslide risk assessment, but it should be viewed as just the initial step in landslide forecasting. Local-scale geological research is essential for understanding the specific characteristics of landslide-prone areas and providing more accurate predictions and effective strategies for landslide risk reduction. Both approaches, when used in conjunction, contribute to a more holistic and robust approach to landslide management and disaster prevention. It is crucial to increase landslide management and risk assessment capacity at the local and regional level. The comprehensive analysis of landslide risks will increase the accuracy of landslide resilience identification.

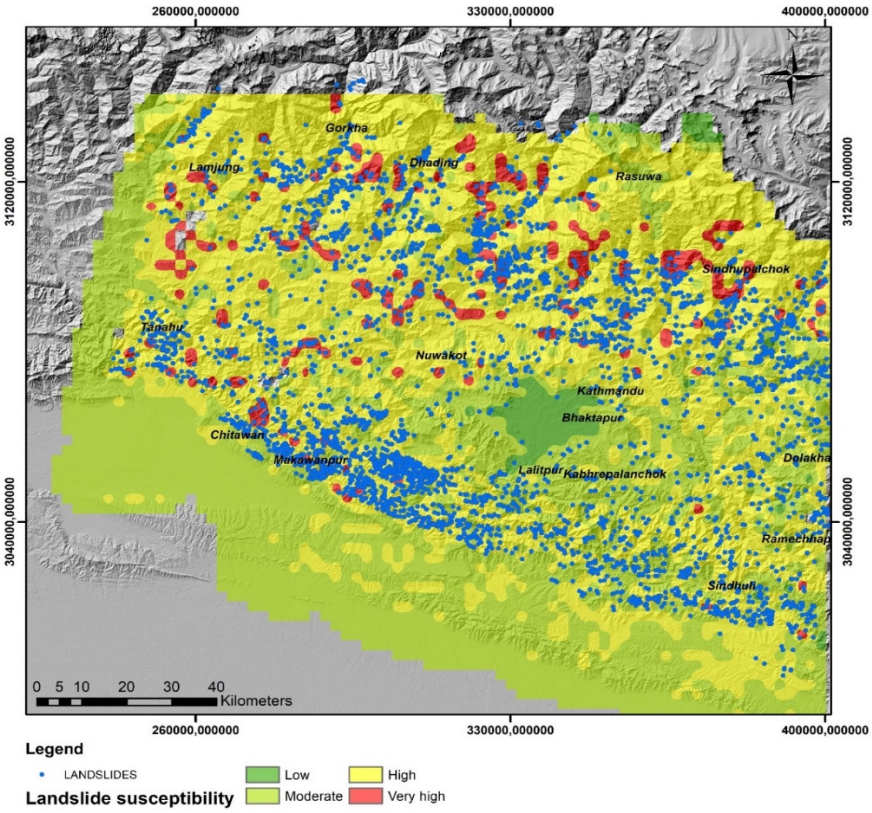


Fig. 6. Landslide susceptibility map, Central Nepal

The developed prognosis models could be applied for better understanding of vulnerability of areas, and to apply the methods of local predictions of landslides within areas with the highest hazards. It enables to develop the appropriate protective measures to withstand the impact of potential landslides in Central Nepal. The Government of Nepal committed to the implementation of the new Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030 to enhance efforts to strengthen disaster risk reduction to reduce losses of lives and assets from disasters, increase the capacity for understanding the disaster risks, strengthen the global cooperation. Therefore the susceptibility modeling and landslide forecasting at the regional level are the first stage of the landslide risk evaluating and management and could be a part of the Disaster Risk Reduction (DRR) cycle. This cycle includes preparation, mitigation, response, and recovery in term of the landslide hazards (Sawalha, 2020; Van den Hurk et al., 2023; Tian, & Lan, 2023).

Authors' contribution: Olena Ivanik – concept and methodology, preparation of the manuscript; Jerome Lave – concept and methodology, preparation and revising of the manuscript; Kateryna Hadiatska – databases and data analysis; Dmytro Kravchenko – data analysis and revising of the manuscript; Eduard Petrushenko – data analysis.

Acknowledgments, sources of funding. This research has been done in the framework of project "Risk assessment of landslide hazards and impact on communities" funded by PAUSE program (France).

References

Adhikari, B. R., & Ojha, R. B. (2021). Geology and Physiography. In: Ojha, R. B., Panday, D. (Eds.) *The Soils of Nepal*. World Soils Book Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80999-7_4.

Bhattarai, K. D. (1984). Computer analysis of the lineaments of Nepal. *Advances in Space Research*, 4(11), 105–113. https://doi.org/10.1016/0273-1177(84)90398-3.

Biswakarma, P., Barman, B. K., Joshi, V., & Rao, K. S. (2020). Landslide susceptibility mapping in east Sikkim region of Sikkim Himalaya using high resolution remote sensing data and GIS techniques. *Appl. Ecol. Environ. Sci.*, 8(4),143–153. https://doi.org/10.12691/aees-8-4-1

Colchen, M., Le Fort, P., & Pécher A. (1986). Recherches géologique dans l'Himalaya du Népal. CNRS Editions. CAH Nepala 35/4.

Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., & Althuwaynee, O. F. (2013). Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural hazards*, 65, 135–165.

Dhital, M. R. (2015). *Geology of the Nepal Himalaya. Regional Perspective of the Classic Collided Orogen*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02496-7

Dhungana, G., Ghimire, R., Poudel, R., & Kumal, S. (2023). Landslide susceptibility and risk analysis in Benighat Rural Municipality, Dhading, Nepal. *Natural Hazards Research*, 3 (2), 170–185. https://doi.org/10.1016 /j.nhres.2023.03.006.

Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 2161–2181. https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018

Gautam, P., Kubota, T., Sapkota, L. M., & Shinohara, Y. (2021). Landslide susceptibility mapping with GIS in high mountain area of Nepal: a comparison of four methods. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1–18.

Jones, J. N., Boulton, S. J., Stokes, M., Bennett, G. L., & Whitworth, M. R. Z. (2021). 30-year record of Himalaya mass-wasting reveals landscape perturbations by extreme events. *Nat. Commun.*, 12, 6701. https://doi.org/10.1038 /s41467-021-26964-8

Kassou, A., Essahlaoui, A., & Aissa, M. A. (2012). Extraction of Structural Lineaments from Satellite Images Landsat 7 ETM+ of Tighza Mining District (Central Morocco). *Geology,* 4(2), 44–48. https://doi.org/10.5829/idosi.rjes.2012.4.2.1110

Kayastha, P., Dhital, M. R., & De Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences,* 52, 398–408.

Lavé, J., & Avouac, J. P. (2001). Fluvial incision and tectonic uplift across the Himalayas of Central Nepal. *J. Geophys. Res.*, 106 (B11), 26561–26591.

Marc, O., Behling, R., Andermann, Ch., Turowski, J. M., Illien, L., Roessner, S., & Hovius, N. (2019). Long-term erosion of the Nepal Himalayas by bedrock landsliding: the role of monsoons, earthquakes and giant landslides. *Earth Surf. Dyn.*, 7, 107–128.

Morin, G. P., Lave, J., France-Lanord, C., Rigaudier, T., Gajurel, A.P., & Sinha, R. (2018). Annual sediment transport dynamics in the Narayani Basin, Central Nepal: assessing the impacts of erosion processes in the annual sediment budget. *J. Geophys. Res. Earth Surf.,* 123, 2341–2376.

Ni, J., & Barazangi, M. (1984). Seismotectonics of the Himalayan collision zone: Geometry of the underthrusting Indian plate beneath the Himalaya. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 89 (B2), 1147–1163 (1978–2012).

Pandey, M. R., Tandukar, R. P., Avouac, J. P., Lavé, J., & Massot, J. P. (1995). Interseismic strain accumulation on the Himalayan Crustal Ramp (Nepal). *Geophys. Res. Lett*., 22, 751–754.

Petley, D., Hearn, G., Hart, A., Rosser, N., Dunning, S., Oven, K., & Mitchell, W. (2007). Trends in landslide occurrence in Nepal. *Natural Hazards,* 43, 23–44. https://doi.org/10.1007/s11069-006-9100-3

Poliakovska, K., Ivanik, O., Annesley, I., Guest, N., & Otsuki, A. (2022). Identification and analysis of structural-tectonic features of geological terrains using lineament analysis: examples of geomodelling for Canadian and Ukrainian shields. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 2 (97), 20–28. http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.03

Putkonen, J. K. (2004). Continuous snow and rain data at 500 to 4400 m altitude. *Arct. Antarct. Alp. Res.,* 36 (2), 244–248.

Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., & Akgun, A. (2014). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 725–742.

Roback, K., Clark, M. K., West, A. J., Zekkos, D., Li, G., Gallen, S. F., Chamlagain, D., & Godt J. W. (2018). The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015 Mw7.8 Gorkha earthquake, Nepal. *Geomorphology*, 301, 121–138. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.030

Roy, J., & Saha, S. (2019). Landslide susceptibility mapping using knowledge driven statistical models in Darjeeling District, West Bengal, India. *Geoenviron Disasters*, 6, 11. https://doi.org/10.1186/s40677-019-0126-8

Sawalha, I. H. (2020). A contemporary perspective on the disaster management cycle. *Foresight*, 22(4), 469–482. https://doi.org/10.1108/FS-11-2019-0097

Shahabi, H., & Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Sci. Rep.*, 5, 9899. https://doi.org/10.1038/srep09899

Sim, K. B., Lee, M. L. & Wong, S. Y. (2022). A review of landslide acceptable risk and tolerable risk. *Geoenviron Disasters*, 9, 3. https://doi.org/10.1186/s40677-022-00205-6

Thapa, P. B., Lamichhane, S., Joshi, K. P., Regmi, A. R., Bhattarai, D., & Adhikari, H. (2023). Landslide Susceptibility Assessment in Nepal's Chure Region: A Geospatial Analysis. *Land*, 12, 2186. https://doi.org/10.3390/land12122186

Tian, N., & Lan, H. (2023). The indispensable role of resilience in rational landslide risk management for social sustainability. *Geography and Sustainability*, 4(1), 70–83. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.11.007

Van den Hurk, B. J. J. M., White, C. J., Ramos, A. M., Ward, Ph. J., Martius, O., Olbert, I., Roscoe, K., Goulart, H. M. D., & Zscheischler, J. (2023). Consideration of compound drivers and impacts in the disaster risk reduction cycle. *Science,* 26(3), 106030. https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106030

Отримано редакцією журналу / Received: 17.06.24
Прорецензовано / Revised: 24.09.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Олена ІВАНІК[1,2], д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-8782-4883
e-mail: ivanik@knu.ua

Жером ЛАВЕ[2], д-р геол. наук
ORCID ID: 0000-0001-8358-2402
e-mail: jerome.lave@univ-lorraine.fr

Катерина ГАДЯЦЬКА[1], канд. геол. наук
ORCID ID: 0000-0003-1334-506X
e-mail: katkravchuk@gmail.com

Дмитро КРАВЧЕНКО[1], канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-6312-819X
e-mail: dmytro.kravchenko@knu.ua

Едуард ПЕТРУШЕНКО[1], магістр
ORCID ID: 0009-0001-6699-2722
e-mail: edik.petrushenko322@gmail.com

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
[2]CRPG, CNRS, Université de Lorraine, France

МОДЕЛЮВАННЯ ЗСУВНОЇ СПРИЙНЯТЛИВОСТІ ЦЕНТРАЛЬНОГО НЕПАЛУ

Вступ. ***Зсувні процеси в Гімалаях становлять велику небезпеку, яка загрожує як життю людей, так і соціально-економічному розвитку регіону. Мета цього дослідження – дослідити основні фактори, що впливають на формування зсувів у Центральному Непалі, зрозуміти їх пріоритетність та взаємовідношення, а також продемонструвати ефективність застосування комплексної методики для оцінки небезпеки зсувів у регіональному масштабі.***

Методи. ***Методика, яка використовується в цьому дослідженні, включає такі етапи: (1) збір даних для аналізу (дані топографії, дані дистанційного зондування, геологічні дані, інвентаризація зсувів); (2) визначення основних факторів зсувної небезпеки, аналіз вхідних параметрів для моделювання; (3) створення карт лінеаментів за допомогою ручного та автоматизованого підходів; (4) картографування зсувної сприйнятливості та просторове моделювання зсувів.***

Результати. ***Ґрунтуючись на аналізі співвідношення геологічних і геоморфологічних даних, моделювання сприйнятливості зсувів у Центральному Непалі дає змогу визначити зони, найбільш схильні до прояву зсувної небезпеки. Аналіз підтверджує істотну роль лінеаментів у формуванні зсувів та їх зв'язок із тектонічними та ерозійними процесами. У зв'язку із цим в регіональну класифікацію зсувів Центрального Непалу необхідно включити зсуви, пов'язані з ослабленими зонами різної природи та орієнтації.***

Висновки. ***Моделювання сприйнятливості та прогнозування зсувів на регіональному рівні є основним етапом оцінки та управління зсувними ризиками. Результати стосуються загального впливу геолого-геоморфологічних і ландшафтних факторів на формування зсувних явищ у Центральному Непалі. Проведення аналізу зсувів та вивчення їх динаміки та режиму можливе лише за умови детальних досліджень та виявлення пріоритету впливу кожного фактора на зсувоутворення. Це дослідження також має на меті надати додаткову інформацію щодо готовності до стихійних лих, мінімізації природних ризиків та забезпечення практики сталого землекористування в регіоні.***

Ключові слова: ***Непал, зсувна небезпека, сприйнятливість, картографування.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.838.5+551.79
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.02

Володимир БАХМУТОВ[1], д-р геол. наук, проф., чл.-кор. НАН України
ORCID ID: 0000-0003-3804-9953
e-mail: bakhmutovvg@gmail.com

Галина МЕЛЬНИК[1], канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3609-1181
e-mail: melnykgv@gmail.com

Дмитро ГЛАВАЦЬКИЙ[1], канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com

Євген ПОЛЯЧЕНКО[1], канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
e-mail: poliachenkoib@gmail.com

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна Національної академії наук України, Київ, Україна

ЕКСКУРСИ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ХРОНУ БРЮНЕС. ЧАСТИНА 2: МАГНІТОСТРАТИГРАФІЯ СУБАЕРАЛЬНИХ ВІДКЛАДІВ ТА ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ

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

Вступ. *Сучасний стан та проблеми дослідження екскурсів хрону Брюнес розглянуто у першій частині статті. Зокрема, зазначено, що найбільш надійно встановленими у хроні Брюнес вважаються екскурси Laschamp (41 тис. років тому), Blake (114 тис. років тому), Iceland Basin (188 тис. років тому). У другій частині статті наведено детальний огляд та приклади застосування геомагнітних екскурсів хрону Брюнес при кореляції субаеральних відкладів плейстоцену, зокрема лесово-ґрунтових товщ України і суміжних країн Європи.*

Методи. *Дослідження лесово-ґрунтових товщ виконувались палеомагнітними та петромагнітними методами. Розрахунок характеристичної компоненти намагнічуваності виконувався статистичними методами сферичних даних.*

Результати. *Представлено нові результати дослідження лесово-ґрунтового розрізу Роксолани, що доповнюють попередню магнітостратиграфічну шкалу. У розрізі виявлено екскурс оберненої полярності на рівні нижньозавадівського педокомплексу (S4; корелянт MIS 11), що в нашій інтерпретації зіставляється з подією Unnamed віком 430 тис. років тому, описаною раніше у лесових розрізах В'язівок і Меджибіж. Обговорено останні роботи з вивчення проблематики впливу екскурсів на зміни довкілля, зокрема на палеоекологічні та кліматичні зміни в останньому льодовиковому періоді.*

Висновки. *Сучасними дослідженнями лесово-ґрунтової формації України виявлено екскурси Unnamed (430 тис. років тому) та Big Lost (540 тис. років тому). Відсутність інших добре задокументованих глобальних екскурсів у верхньоплейстоценових лесово-ґрунтових відкладах може пояснюватися як неповнотою відбору зразків, так і стратиграфічними перервами, особливостями палеомагнітного "запису" та недостатньою вивченістю магнітної мінералогії цих порід. Вплив інверсій та екскурсів геомагнітного поля на зміни довкілля є дискусійним питанням, що потребує подальших досліджень, особливо у сфері пошуку механізмів такого впливу. Оскільки багато дослідників підкреслюють роль атмосферного озону у змінах клімату та довкілля, запропонований у (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020) механізм може пояснювати зв'язок змін геомагнітного поля та клімату.*

Ключові слова: *інверсії та екскурси геомагнітного поля, магнітостратиграфія, лесово-ґрунтові серії, зміни навколишнього середовища, плейстоцен.*

Вступ

У першій частині статті було розглянуто сучасний стан дослідження екскурсів хрону Брюнес (Бахмутов та ін., 2023). На сьогодні найбільш надійно встановленими у хроні Брюнес вважаються екскурси Laschamp (41 тис. років тому), Blake (114 тис. років тому), Iceland Basin (188 тис. років тому), а найбільшою проблемою є достовірне визначення екскурсів у часовому інтервалі 0–30 тис. років тому. Достовірно встановлені екскурси можуть слугувати надійними стратиграфічними реперами для кореляції четвертинних відкладів, оскільки вони є короткочасними в геологічних масштабах часу подіями, які мають глобальний чи регіональний характер. Останнє рекомендують враховувати при побудові хроностратиграфічних шкал.

Друга частина статті присвячена актуальним питанням залучення екскурсів у розв'язанні проблем стратиграфії, палеокліматології та екології антропогену, зокрема результатам досліджень екскурсів у субаеральних відкладах плейстоцену України та деяким імовірним механізмам впливу екскурсів на зміни довкілля, насамперед на зміни клімату.

Запис екскурсів в субаеральних відкладах. Залучення палеомагнітного методу для розв'язання задач стратиграфії в 1960-х роках і подальші інтенсивні дослідження субаеральної формації плейстоцену України, Китаю і Центральної Азії передусім були скеровані на побудову магнітостратиграфічної шкали. Здавалося, що перші обнадійливі результати дадуть відповіді на питання кореляції четвертинних відкладів за палеомагнітними даними (див. посилання у Бахмутов та ін., 2023). Однак із часом виявилося, що при інтерпретації результатів виникало багато суперечливих тлумачень як стратиграфічних, так і магнітостратиграфічних схем. Як недавній приклад можна навести огляд з отриманням нових даних щодо положення межі Матуяма–Брюнес в опорних розрізах лесово-ґрунтової формації плейстоцену України (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020; Бахмутов и др., 2021). З екскурсами проблема набагато складніша, тому окремо слід зупинитися на особливостях "запису" екскурсів в субаеральних відкладах.

Основною проблемою у визначенні екскурсів у лесових горизонтах, порушених подальшими процесами ґрунтоутворення, є затримка палеомагнітного "запису", що зумовлюється глибиною фіксації (lock in depth) намагніченості у досліджуваних породах. Така "затримка" пояснюється тим, що вторинні процеси намагнічування (постседиментаційні, хімічні, в'язкі), зумовлені зазвичай процесами педогенезу, "зміщують" палеомагнітний "запис" униз по товщі розрізу, і відбувається як його здавнішання, так і згладжування (тобто спотворення) (див., наприклад, Большаков (1995; 2004)). При зміщенні глибини фіксації на кілька метрів, згідно із запропонованою В.А. Большаковим схемою, напрямки залишкової намагніченості контролюються постседиментаційною намагніченістю, яка може формуватися значно пізніше. При цьому "запис" варіацій геомагнітного поля у породах суттєво згладжується, а короткочасні різкі зміни компонент поля (наприклад, екскурси) можуть взагалі не фіксуватися. Можливість впливу таких процесів на палеомагнітний "запис" показано на прикладі вивчення геомагнітних екскурсів, "запис" яких спотворювався чи здавнішав на рівнях розвинутого педогенезу лесово-ґрунтових розрізів (Fang et al., 1997; Zhu et al., 1994, 2007; Sun et al., 2013). Водночас намагніченості у "записах" екскурсів у лесових горизонтах (Zhu et al., 1994; Sun et al., 2013), а також виділення вікових геомагнітних варіацій (Evans, & Heller, 2003), вказують на значно меншу "глибину фіксації" для лесів порівняно з ґрунтами.

В узагальнювальній роботі з магнітостратиграфії лесових розрізів Китаю (Liu et al., 2015) розглянуті палеомагнітні і петромагнітні дані за майже 40 років і зроблена спроба кореляції континентальних палеокліматичних (на основі петромагнітних даних) "записів" із результатами, отриманими для морських глибоководних відкладів. Попри детальні дослідження десятків лесово-ґрунтових розрізів, автори (Liu et al., 2015) роблять висновок, що окрім границі Матуяма–Брюнес, стратиграфічне положення інших геомагнітних подій (екскурсів) встановлено ненадійно і потребує уточнення. Проте й аналіз розташування границі Матуяма–Брюнес на стратиграфічних шкалах вказує на її "плаваючу" приуроченість то до ґрунтових горизонтів, то до лесових (Бахмутов, & Главацкий, 2016).

У пізніших роботах (Bolshakov, 2017; Jin et al., 2019; Hlavatskyi, 2019; Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020, 2021), однак гіпотеза "lock in depth" була переглянута. Зокрема, "плаваюче" положення межі Матуяма–Брюнес у більшості лесових розрізів Китаю та України пояснюється некоректним стратиграфічним розчленуванням, перервами в осадонакопиченні, неточним визначенням межі між ґрунтовими та лесовими горизонтами. Як виявилось, гранулометричні аналізи вказують на більшу фактичну потужність ґрунтового горизонту за рахунок частини лесового (де і визначалась границя Матуяма–Брюнес), на відміну від візуального визначення у польових умовах та за даними магнітної сприйнятливості (Liu et al., 2015; Jin et al., 2019).

Саме через перерви у седиментації екскурси не так часто фіксуються в четвертинних лесових відкладах, зокрема в межах детально вивчених розрізів Китайського лесового плато і Європи, включаючи досліджений нами стратотип лесово-ґрунтової формації України – розріз Старі Кайдаки (Hlavatskyi et al., 2021). Однак у багатьох ранніх європейських (та українських) дослідженнях лесів була опублікована інформація про численні "геомагнітні екскурсії". На нашу думку, це було зумовлено недосконалістю в методиці палеомагнітних досліджень, зокрема неврахуванням впливу в'язкої складової залишкової намагніченості, і такі записи "екскурсів" не були зумовлені змінами геомагнітного поля (див. обговорення в Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020).

Під час наших досліджень тільки деякі екскурси були зафіксовані у субаеральних відкладах середнього плейстоцену (рис. 1). Безіменна подія (Unnamed; 430 тис. років тому) виявлена у розрізах В'язівок (Hlavatskyi, & Bakmutov, 2020), Меджибіж (Главацкий и др., 2021), а екскурс Big Lost (540–580 тис. років тому) – у розрізах Роксолани (Bakhmutov et al., 2017) та Долинське (Hlavatskyi, & Bakmutov, 2021). Крім того, у розрізі Роксолани було визначено екскурс прямої полярності у хроні Матуяма, попередньо зіставлений із Kamikatsura (867–900 тис. років тому). Визначення на цих розрізах інших надійно задокументованих екскурсів, зокрема Lachamp та Blake, потребує подальших детальних досліджень з безперервним (суцільним) відбором зразків.

У розрізах західної частини України, при детальному відборі орієнтованих зразків на розрізі верхнього плейстоцену Колодіїв, було ідентифіковано екскурси Blake та Lachamp (Nawrocki, Boguckyj, & Łanczont, 2007). У розрізі Скала Подільська у нижній частині верхнього педокомплексу, сформованого на відкладах останнього інтергляціального ґрунту (на глибині 0,5 м від поверхні), було визначено епізод Blake (Boguckyj et al., 2009). Палеомагнітна подія Pringle Falls (212 тис. років тому) була виявлена в археологічній стоянці Великий Глибочок (Łanczont et al., 2014). Крім того, на палеолітичній стоянці Пронятин було ідентифіковано екскурс Blake (Łanczont et al., 2015). Ймовірний екскурс Hilina Pali (18 тис. років тому) описано у розрізі Рівне у верхній частині останнього лесового горизонту (Nawrocki et al., 2018). Слід зазначити, що деякі з цих екскурсів були визначені тільки по одному зразку, а відносно екскурсу Hilina Pali критичні зауваження були зроблені в (Snowball, 2018).

Відклади плейстоцену печери Буковинка також досліджувалися палеомагнітним методом (Bondar, & Ridush, 2015). Один зразок показав аномальне значення схилення (близько 60°), що автори інтерпретували як прояв екскурсу Etrussia близько 2,8 тисяч років тому.

Серед найповніших розрізів геомагнітних епізодів у субаеральних відкладах доцільно розглянути свердловину Udvari-U2 у басейні річки Дунай (Угорщина), у якій магнітозони зворотної полярності в межах хрону Брюнес були інтерпретовані (Sümegi et al., 2018) як Blake (120 тис. років тому), Iceland Basin (191 тис. років тому), Levantine (362 тис. років тому), Unnamed (430 тис. років тому) та Stage 17 (670 тис. років тому). Ця свердловина має потужність 170 м (зокрема, відклади епохи Брюнес – верхні 70 м), палеопедологами не зафіксовано стратиграфічних перерв, а магнітостратиграфічні висновки обґрунтовано численними знахідками фауни.

Як приклад палеомагнітних досліджень у субаеральних відкладах та їхньої магнітостратиграфічної інтерпретації наведемо нові результати дослідження лесово-ґрунтового розрізу Роксолани в Північному Причорномор'ї.

Екскурс Unnamed (430 тис. років тому) у лесово-ґрунтовому розрізі Роксолани.

Геологічне положення. Розріз плейстоценових відкладів Роксолани – один із найвідоміших європейських лесово-ґрунтових розрізів, що детально вивчали численні українські та міжнародні команди (див. огляд в Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020; Bakhmutov, Hlavatskyi, & Poliachenko, 2023). Відслонюється (46°11′ пн.ш.; 30°26′ сх.д.) на лівому березі Дністровського лиману у вигляді лесових кліфів потужністю до 55 м і є, вірогідно, найбільш потужним лесово-ґрунтовим розрізом Причорноморської низовини. За відсутності якісних

літопалеопедологічних досліджень, достовірних хронологічних даних, а також через труднощі у виділенні напрямків найбільш стабільної (характеристичної) компоненти залишкової намагніченості (ChRM), стратиграфія розрізу Роксолани та положення межі Матуяма–Брюнес викликали жваві дискусії, починаючи з часу його вивчення – у 1970-х рр. і дотепер. Недавно співавтори цієї статті (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020) запропонували нове стратиграфічне розчленування, що базується на положенні межі Матуяма–Брюнес, палеомагнітних реперів (рис. 1) та сучасних даних люмінесцентного датування верхньої частини розрізу.

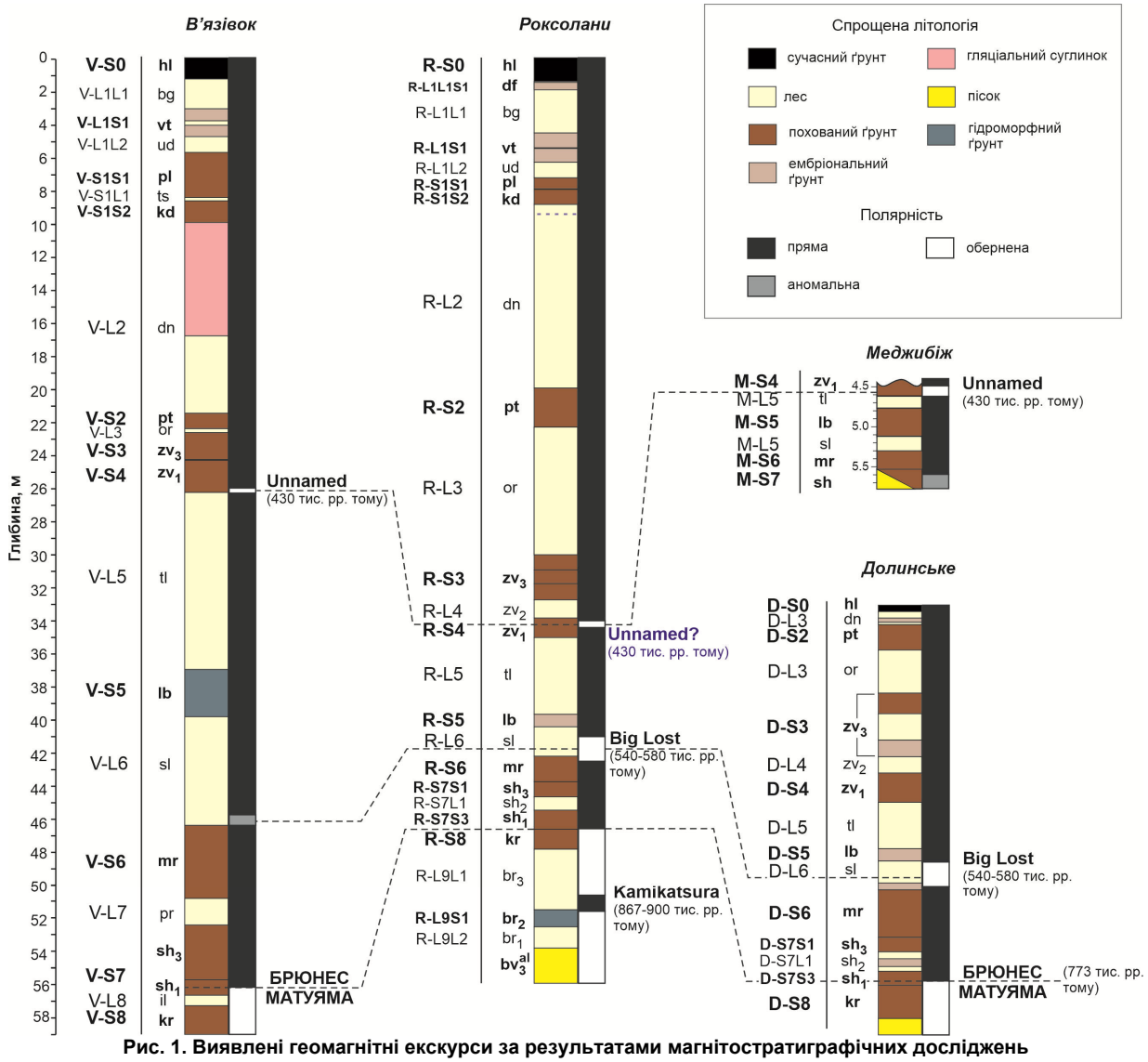


Рис. 1. Виявлені геомагнітні екскурси за результатами магнітостратиграфічних досліджень лесово-ґрунтових розрізів України:

В'язівок (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020), Роксолани (Bakhmutov et al, 2017; Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2019), Меджибіж (Hlavatskyi, 2019; Главацкий и др., 2021), Долинське (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2021). Індекси позначають стратиграфічні горизонти: hl – голоцен, bg – бузький, vt – витачівський, ud – удайський, pl – прилуцький, ts – тясминський, kd – кайдацький, dn – дніпровський, pt – потягайлівський, or – орільський, zv – завадівський, tl – тилігульський, lb – лубенський, sl – сульський, mr – мартоноський, pr – приазовський, sh – широкинський, il – іллічівський, kr – крижанівський, br – березанський, bv – берегівський. Екскурс Unnamed (430 тис. років тому) запропоновано для розрізу Роксолани за палеомагнітними даними, наведеними у цій статті

Методи

У процесі додаткових досліджень пілотної колекції 18 зразків із розрізу Роксолани у палеомагнітній лабораторії Інституту геофізики Польської академії наук (м. Варшава, 2022 р.), зразки попередньо розмагнічували змінним магнітним полем установкою, що супроводжує кріогенний магнітометр 2G SQUID DC. Отримані дані порівнювались із результатами ступеневого температурного розмагнічування, проведеного в пічці MMTD 80, і виміряними на магнітометрі JR-6 у немагнітній кімнаті MMLFC Центру колективного користування магнітометричними приладами Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Зразки розмагнічували змінним магнітним полем із кроком 2,5–20 мТл до 100–120 мТл та температурою з кроком 30–50 °C до 350 °C. Після кожного нагріву на містку змінного струму MFK1-FB вимірювали магнітну сприйнятливість для контролю можливих мінералогічних змін. Було виконано аналіз компонент природної залишкової намагніченості (natural remanent magnetization, NRM) та розраховано напрямки давнього магнітного поля за стандартними методиками.

Результати

Дані за 17 з 18 зразків, розмагнічених змінним магнітним полем у Варшавській лабораторії, узгоджуються з попередніми даними (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020) для всього інтервалу глибин. Один зразок із нижньозавадівського педокомплексу (R-S4, MIS 11) на глибині 34,11 м має другу стабільну компоненту (ChRM), що вказує на обернену полярність (рис. 2а). Напрямки характеристичної компоненти зразка-дубля із глибини 34,10 м, розмагніченого температурою, також тяжіють до оберненої полярності (рис. 2б). Зразки вище і нижче із нижньозавадівського горизонту вказують виключно на пряму полярність.

З огляду на положення екскурсу Unnamed віком 430 тис. років тому в нижньозавадівському горизонті в попередньо вивчених розрізах В'язівок і Меджибіж, можна припустити, що в розрізі Роксолани зона оберненої полярності також може бути віднесена до даного екскурсу, що підтверджується результатами розмагнічування двох зразків-дублів у різних лабораторіях різними методами. Проте в розрізах В'язівок і Меджибіж вказана зона оберненої полярності розташована в нижній частині педокомплексу, на відміну від розрізу Роксолани, де зона оберненої полярності розташована на глибинах 34,10–34,11 м, дещо вище від середньої частини ґрунтового комплексу. За палеопедологічними даними (див. посилання в Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020) у розрізі Роксолани даний педокомплекс – у минулому добре розвинений, проте частково денудований, із зрізаним гумусовим горизонтом. У лесово-ґрунтовій формації Європи педокомплекс MIS 11 зазвичай добре розвинений і має удвічі більшу потужність, зокрема у сусідніх розрізах Санжійка і Курортне. У нашій інтерпретації, у розрізі Роксолани збереглася лише нижня частина нижньозавадівського педокомлексу, разом із палеомагнітним записом екскурсу, який доцільно віднести до Unnamed віком 430 тис. років тому за аналогією до інших розрізів України і Угорщини.

Отже, поряд із границею Матуяма–Брюнес, достовірно встановлені геомагнітні екскурси можна вважати перспективними маркерами при кореляції четвертинних субаеральних відкладів (рис. 1).

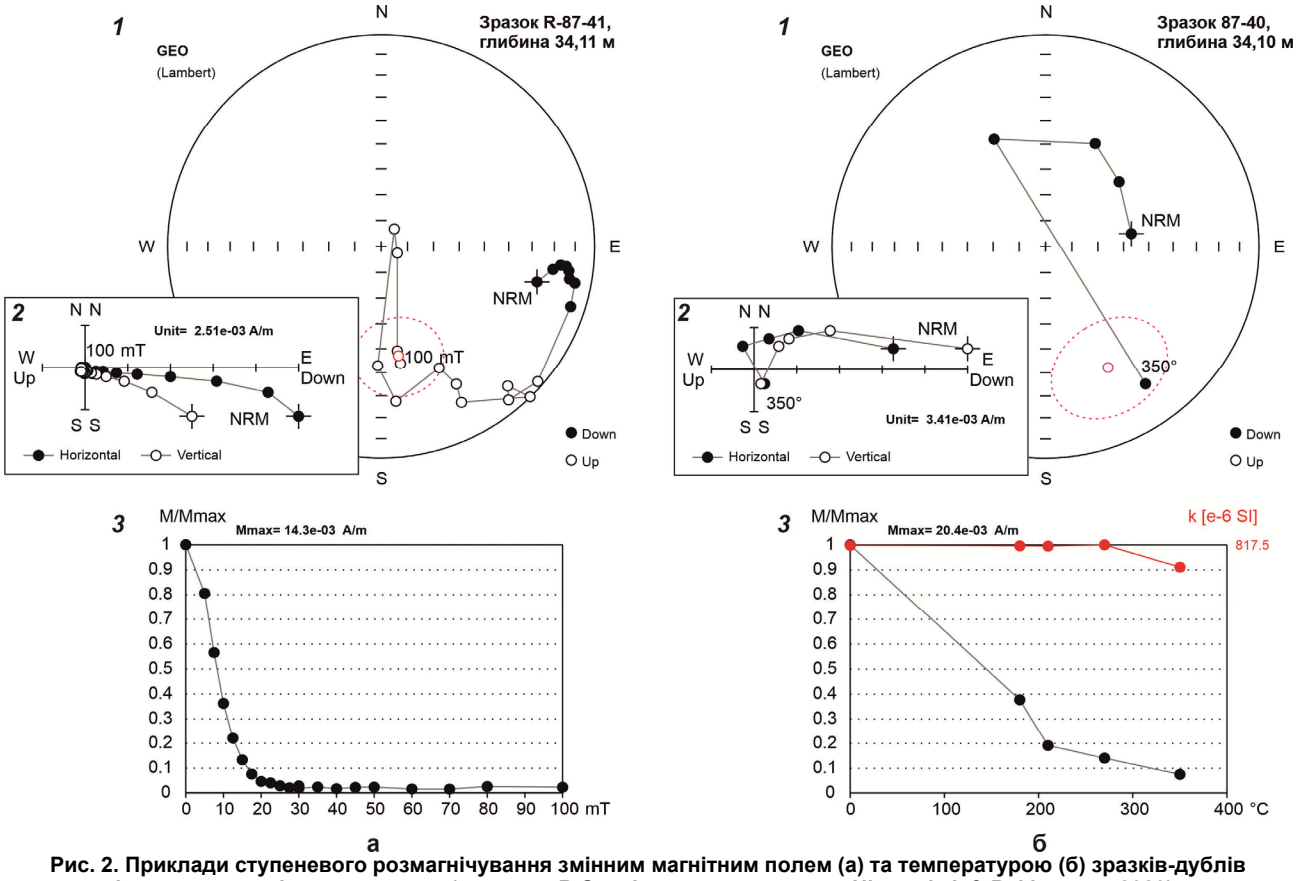


Рис. 2. Приклади ступеневого розмагнічування змінним магнітним полем (а) та температурою (б) зразків-дублів із нижньозавадівського ґрунту (горизонт R-S4 згідно розчленування Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020):
1 – стереографічні проєкції напрямків природної залишкової намагніченості (NRM), пусті (залиті) точки – проєкції векторів на верхню (нижню) півсферу у проєкції Ламберта; 2 – діаграми Зійдервельда; 3 – криві розмагнічування NRM (M/M_{max}) та результати вимірів магнітної сприйнятливості (k) після нагрівів

Значення екскурсів для магнітостратиграфії. Роль екскурсів як магнітостратиграфічних маркерів широко обговорюється в публікаціях останніх років. Зокрема, у (Laj, Channell, & Kissel, 2021) наголошується, що методи магнітостратиграфії у своєму розвитку пройшли шлях від планетарних масштабів змін геомагнітної полярності з часовими інтервалами порядку кількох сотень тисяч років до екскурсів, які дають змогу досягти роздільної здатності у кілька сотень років. Крім того, хоча в деяких роботах (Большаков, 2007) встановлення екскурсів за даними VADM (virtual axial dipole moment) викликало справедливу критику, значне зниження напруженості геомагнітного поля під час екскурсів відкриває нові можливості для встановлення кореляційних зв'язків з іншими природними архівами, такими як керни льоду з Гренландії або Антарктиди (Laj, Channell, & Kissel, 2021). Під час зменшення напруженості поля збільшується потік космогенних ізотопів, таких як ^{10}Be,

^{36}Cl і ^{14}C, що надходять на поверхню Землі після їх утворення у верхніх шарах атмосфери, та концентрація яких вимірюється в льодових кернах. Нарешті, ідентифікація профілів палеонапруженості в осадових товщах забезпечує досить точну кореляцію та відкриває новий етап магнітної стратиграфії високої роздільної здатності, який активно розвивається.

Зв'язок екскурсів зі змінами довкілля. Чи впливають екскурси геомагнітного поля на довкілля? Це питання напряму стосується теми зв'язку змін геомагнітного поля зі змінами клімату. Є як противники, так і прибічники існування такого зв'язку, а найбільше публікацій за цією тематикою присвячено події Lashamp. Швейцарські вчені виконали розрахунки стану атмосфери під час екскурсу з використанням глобальної хімічної кліматичної моделі SOCOL-MPIOM (Suter et al., 2014). Їхні розрахунки показали значне збільшення концентрації водню та оксиду азоту внаслідок посиленої іонізації галактичними космічними променями (ГКП), зміни концентрації озону, які є причиною значних зональних аномалій вітру, до 5 м/с у стратосфері та до 2 м/с у тропосфері, посилення циркумполярних вихорів взимку. Це добре узгоджується з датованими з високою роздільною здатністю даними полярних льодових кернів та субтропічних спелеотем. Однак автори роблять висновок, що геомагнітні екскурси, швидше за все, не мають прямого і значного впливу на глобальний клімат.

Натомість Cooper et al. (2021), використовуючи ту ж саму глобальну хімічну кліматичну модель SOCOL-MPIOM для своїх розрахунків, роблять висновок про вплив події Lashamp, в поєднанні зі значними сонячними мінімумами, на істотні зміни в концентрації і циркуляції озону в атмосфері. Як вказувалось вище, екскурс Lashamp відбувався на фоні зниженої палеонапруженості геомагнітного поля. Автори (Cooper et al., 2021) вважають, що підвищений рівень сонячної та космічної радіації, яка досягає атмосфери Землі через ослаблене геомагнітне поле, ймовірно, збільшив іонізацію атмосфери та знизив рівень озону у стратосфері, потенційно спричинивши регіональні кліматичні зміни, прояви яких фіксуються в басейні Тихого океану. Це локальні льодовикові максимуми в Австралазії та Андах, засуха на всьому континенті та вимирання мегафауни в Австралії, які відбулися ~40–42 тис. років тому. У той самий період у Північній Америці спостерігалося швидке, виражене розширення Лаврентидського льодовикового щита від його мінімуму ~42 тис. років тому. Для встановлення хронологічної послідовності цих подій та їхнього ймовірного зв'язку з екскурсом Lashamp були залучені нові точні часові прив'язки, отримані завдяки дослідженням природного архіву – дерев каурі (Agathis australis) з північної частини Нової Зеландії (Cooper et al., 2021). Детальний радіовуглецевий аналіз залишків цих дерев у поєднанні з даними спелеотем печери Хулу, датованих за ^{230}Th методом, дав змогу виконати реконструкцію атмосферного ^{14}C під час екскурсу Laschamp. Було виявлено значні зміни концентрації атмосферного радіовуглецю до та під час Laschamp, що, як порівняти з палеомагнітними даними, дозволило встановити, що фаза оберненої полярності події Laschamp тривала від 41,56 до 41,05 тис. років тому. Запис Каурі-Хулу дав змогу зкорелювати подію зі змінами навколишнього середовища у планетарному масштабі. Було відзначено, що ~42 тис. років тому в середніх і низьких широтах відбулися одночасні кліматичні та екологічні події (рис. 3). Це збіглося з ослабленим геомагнітним полем Землі, яке безпосередньо передувало екскурсу Laschamp, і загалом, *Cooper et al., (2021)* назвали цю подію *"Adams Transitional Geomagnetic Event"* (далі "Подія Адамса"). Низька напруженість геомагнітного поля під час "Події Адамса", разом із великими змінами інтенсивності космічного випромінювання, призвели до збільшення атмосферної іонізації та ультрафіолетового (УФ) випромінювання на до 25–40 % і 10–15 % порівняно із сучасним рівнем, особливо в екваторіальних і низьких широтах (<40°). Автори наголошують, що "Подія Адамса" дуже близька за часом до глобального поширення фігуративного наскельного мистецтва, відбитків рук з червоної охри у печерах, наприклад у Європі та на островах Південно-Східної Азії, яке датується ~40–42 тис. років тому. Вони інтерпретують це як використання печер як укриття від збільшення ультрафіолету В під час "Події Адамса". У цій же роботі перекалібрований час вимирання неандертальців становить від 40,9 до 40,5 тис. років тому, разом зі зникненням деяких перших європейських культур і подальшою широкою появою ориньякського технокомплексу. Також автори (Cooper et al., 2021) висловлюють припущення, що геомагнітний екскурс Mono Lake (34 тис. років тому) відзначається чітким піком ^{14}C у сталагміті печери Хулу і може бути причиною наступного вимирання мегафауни в Євразії. Загалом автори пропонують нову модель раптових палеокліматичних змін – через геомагнітні екскурси можуть змінюватися широтні температурні градієнти, оскільки відбувається різке збільшення космічної радіації та зниження концентрації озону. Вказано на можливий глобальний вплив геомагнітних інверсій з набагато віддаленішими у часі наслідками, оскільки інверсія відбувається набагато довше, ніж екскурс. В останні роки опубліковано багато робіт на цю тему, зокрема про низьку величину напруженості та гіперактивний (інверсійний) режим геомагнітного поля наприкінці едіакарію – початку кембрію, що гіпотетично пояснює феномен "кембрійського вибуху", коли швидко і майже одночасно на нашій планеті виникло безліч нових біологічних форм (див., наприклад, (Shcherbakova et al., 2020), і посилання в ній). Природно, що публікація такого матеріалу викликає підвищений інтерес та дискусію, зокрема у (Hawks, 2021 та посилання в ній) наведені аргументи, що заперечують вплив екскурсів геомагнітного поля на такі значні зміни довкілля.

За нашими дослідженнями нижньостратосферний озон відіграє важливу роль у можливому впливі геомагнітного поля на клімат. Механізм такого впливу являє собою ланцюг причинно-наслідкових зв'язків, який починається з модуляції потоків космічних променів геомагнітним полем. Далі частинки космічних променів впливають на концентрацію озону в нижній стратосфері, яка впливає на водяну пару на висотах нижньої стратосфери-верхньої тропосфери, які є надзвичайно чутливими до будь-яких змін вологості та мають вплив на радіаційний баланс планети, а отже і на приземну температуру (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020). Цей механізм оснований на даних прямих спостережень та емпіричних моделей для останніх 120 років, однак він дає найбільш реалістичне на сьогодні пояснення зв'язку геомагнітного поля і клімату.

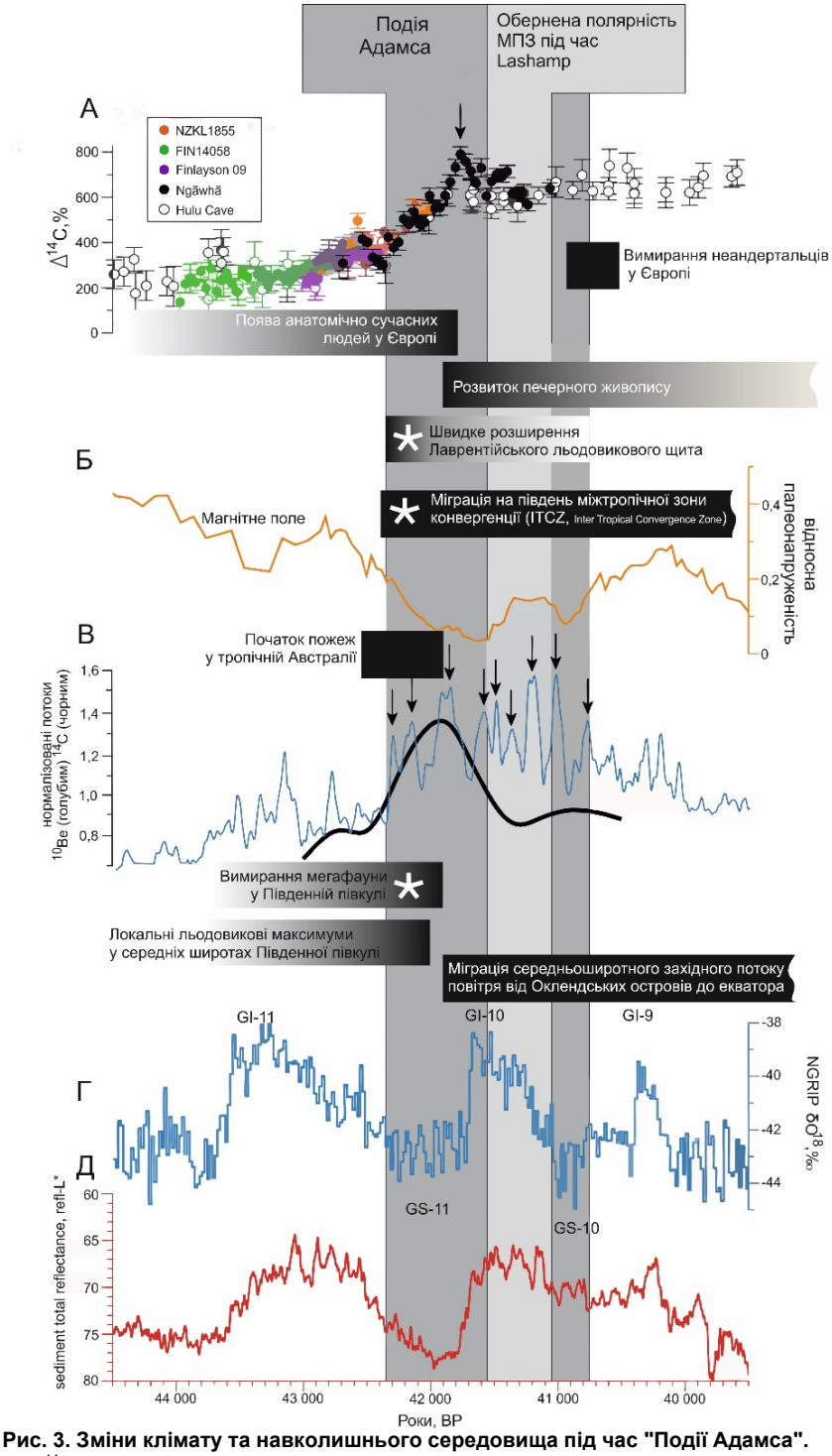


Рис. 3. Зміни клімату та навколишнього середовища під час "Події Адамса".
(А) Значення $\Delta^{14}C$ за даними по деревах каурі (кольорові суцільні кружечки позначають окремі дерева) порівняно з даними радіовуглецевого аналізу з печери Хулу (порожні кружечки). Стрілка позначає пік $\Delta^{14}C$, який збігається з помітним GSM (Grand Solar Minima, тривалим періодом низької сонячної активності). (Б) Крива відносної палеонапруженості геомагнітного поля, побудована за даними відкладів Чорного моря та льодового керну з Гренландії. (В) Нормалізований потік ^{10}Be за даними з Гренландії (блакитна лінія) проти змодельованих темпів накопичення ^{14}C з набору даних каурі-Хулу (товста чорна лінія). Посилені піки ^{10}Be під час ослабленого геомагнітного поля відповідають підвищенню іонізуючого випромінювання під час GSM (стрілки). (Г) Запис $\delta^{18}O$ за Проєктом дослідження льоду Північної Гренландії (NGRIP). Показано Гренландські інтерстадіальні (потепління) події GI-11 та GI-9, а також слабку Гренландську стадіальну подію (GS-10), яка може вказувати на локальне різке похолодання, що перериває інтерстадіальну подію, яка спочатку складалася з GI-10 і GI-9. (Д) Вимірювання коефіцієнта повного відбиття осадів (sediment total reflectance, refl-L*) в улоговині Каріако, який показує відсутність чіткого сигналу GS-10. Обернена полярність магнітного поля Землі (МПЗ) – світло-сірий стовпчик, фази переходу по боках – темно-сірі стовпчики, причому останні є найслабшими періодами магнітного поля Землі, які збігаються з GS-11 і GS-10. Зірочками показано події, які збігаються зі змінами геомагнітного поля під час Lashamp та проявляються в багатьох частинах світу (адаптовано з Cooper et al., 2021, Fig. 1, 4)

У (Channell, & Vigliotti, 2019) зазначено, що після покращення методів датувань та аналізу палеонтологічних знахідок, еволюційні події четвертинного періоду стали чіткіше обмеженими в часі. Довго вважалося, що на біологічну еволюцію впливає ультрафіолетове випромінювання, яке досягає поверхні Землі. На саме ультрафіолетове випромінювання може впливати величина дипольного магнітного поля Землі через свою роль у формуванні стратосферного озону (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020). Загибель неандертальців на рівні ~41 тис. років може бути зумовлена мінімумом напруженості геомагнітного поля як захисного екрана, що пов'язане з магнітним екскурсом Lashamp, а виживання анатомічно сучасних людей можна пояснити відмінностями в ариловому вуглеводневому рецепторі, який відіграє ключову роль в еволюційній реакції на потік ультрафіолету. Викопні рештки з Австралії вказують на те, що пізнє четвертинне вимирання мегафауни ссавців у часі співвідноситься з геомагнітними екскурсами Lashamp та Blake, а вік пізнього четвертинного вимирання в Північній Америці та Європі збігається зі значним зниженням напруженості геомагнітного поля на рівні ~13 тис. років.

Якщо вважати, що геомагнітне поле вплинуло на еволюцію великих ссавців-довгожителів через зміни ультрафіолетового випромінювання в періоди слабкої напруженості поля, то вогнища вимирань у різних регіонах можна пояснити геометрією руйнування стратосферного озону під час епізодів низької напруженості поля – озонові діри переважно розташовані у високих широтах, зважаючи на роль стратосферних температур і полярних стратосферних хмар у виснаженні озонового шару. Вимирання в Австралії під час екскурсів Lashamp і Blake може означати, що виснаження стратосферного озону в цей час відбувалося в основному в Південній півкулі, а в Північній півкулі вимирання пов'язане зі зниженням напруженості поля на ~13 тис. років (Channell, & Vigliotti, 2019).

У роботі (Orgeira, Sinito, & Compagnucci, 2016) зроблено огляд різних гіпотез про вплив змін сонячної активності та загального сонячного випромінювання (TSI), отриманих унаслідок змін земних орбітальних параметрів, та змін геомагнітного поля на клімат. Автори вважають, що такі зміни є важливими зовнішніми факторами кліматичної мінливості. На їхню думку, впродовж голоцену це сонячна та геомагнітна активність, для плейстоцену – зміни інсоляції, викликані змінами орбітальних параметрів, а також інверсії та екскурси геомагнітного поля. За (Orgeira, Sinito, & Compagnucci, 2016), механізм впливу геомагнітного поля пов'язаний з модуляцією потоків космічних променів, які, у свою чергу, можуть впливати на хмарний покрив.

Важливим кроком у розробці механізмів впливу екскурсів геомагнітного поля на клімат є робота (Gao et al., 2022), де розраховані глобальні сітки жорсткості геомагнітного обрізання (кількісної міри здатності геомагнітного поля екранувати Землю від космічного випромінювання). Автори роботи наголошують, що цей параметр вперше розрахований для екскурсу Lashamp на основі моделі геомагнітного поля LSMOD.2, що охоплює період 50–30 тис. років. Розрахунки виконані для середньої точки екскурсу, коли дипольний момент близький до нуля, і домінують недипольні компоненти. Визначено, що в цей час жорсткість обрізання є нижчою за 4 ГВ (жорсткість обрізання на 60° геомагнітної широти, вище від якої інтенсивність космічного випромінювання майже постійна і приблизно вдвічі вища, ніж на екваторі, де для сучасного геомагнітного поля ефект екранування є максимальним та зменшується зі збільшенням геомагнітної широти). Вона майже не залежить від широти, що вказує на те, що космічне випромінювання під час екскурсу було глобально приблизно вдвічі більшим, ніж на сучасному геомагнітному екваторі. Результати обчислення граничної жорсткості, представлені в (Gao et al., 2022), дають змогу оцінити швидкість виробництва космогенних ізотопів на основі реалістичної моделі геомагнітного поля під час екскурсу Lashamp. Якість розрахунків обмежується як точністю самої моделі LSMOD.2, яка, базується на палеомагнітних даних з притаманними їм хронологічними похибками, та нерівномірним просторовим і часовим покриттям земної кулі, так і відсутністю реалістичної моделі палеомагнітосфери під час екскурсу.

Інші автори (Chen et al., 2015) припускають тісний зв'язок між геомагнітними інверсіями (як гіпотетичними індикаторами збільшення теплового потоку на границі ядро-мантія), змінами клімату та швидкістю субдукції у масштабах десятків мільйонів років. Вони порівняли частоту геомагнітних інверсій і циклічність змін клімату за останні 73 млн років і виявили їхню спільну періодичність, яка становить 13 млн років. Вона порушується на кінцях досліджуваного інтервалу, оскільки найновіший та найдавніший часові інтервали лежать за межами конуса рівня довіри 95 % при розрахунках періодів. Таку саму періодичність було виявлено і для швидкості субдукції тектонічних плит, оскільки автори виходили з припущення, що геомагнітні інверсії та утворення морського дна можуть бути пов'язані. Вейвлет-спектр швидкості субдукції показав період ~13 млн років між 70 і 17 млн років тому, так само як для геомагнітних інверсій та записів $\delta^{18}O$, а отже, автори роблять висновок, що всі ці параметри пов'язані між собою. Зміна швидкості субдукції або випереджає, або відстає від інших двох параметрів. Автори (Chen et al., 2015) дають пояснення для обох випадків (у першому це пов'язано зі збільшенням теплового потоку на межі ядро-мантія, у другому – зі змінами галактичної орбіти Сонячної системи, проходження Землі крізь темну матерію в галактичній площині та нагрівання ядра), хоча ці пояснення складні та часом неоднозначні.

Дискусія і висновки

В останні роки у лесово-ґрунтовій формації України було встановлено ряд екскурсів, зокрема Unnamed (430 тис. років тому) та Big Lost (540 тис. років тому). Результати додаткових палеомагнітних досліджень лесово-ґрунтового розрізу Роксолани вказують на положення зони оберненої полярності у нижньозавадівському кліматоліті (MIS 11), яка зіставляється нами з подією Unnamed віком 430 тис. років тому в розрізах В'язівок і Меджибіж. Відсутність деяких добре задокументованих глобальних екскурсів у верхньоплейстоценових лесово-ґрунтових відкладах спричинена неповнотою відбору зразків, стратиграфічними перервами осадконакопичення, особливостями палеомагнітного "запису" та недостатньою вивченістю магнітної мінералогії цих порід.

Питання впливу інверсій та екскурсів геомагнітного поля на зміни довкілля лежить у площині пошуку достовірних механізмів такого впливу на різних часових шкалах. Запропонований у (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020) механізм може пояснювати зв'язок змін геомагнітного поля та клімату, особливо з огляду на те, що багато дослідників підкреслюють роль атмосферного озону у змінах клімату та довкілля. Це питання є досить дискусійним, має як прибічників, так і опонентів та потребує подальших досліджень.

Внесок авторів: Володимир Бахмутов – концептуалізація, написання (перегляд і редагування); Галина Мельник – формальний аналіз, написання (оригінальна чернетка); Дмитро Главацький – методологія, валідація даних, написання (оригінальна чернетка); Євген Поляченко – формальний аналіз, методологія.

Подяка та джерела фінансування: Дослідження виконувалися за бюджетним асигнуванням відомчої фундаментальної тематики Національної академії наук України для наукової роботи "Магнетизм субаеральних відкладів антропогену України у вирішенні задач стратиграфії, палеокліматології та екології" (шифр: III-5-24; № держ. реєстрації 0124U000085) та за підтримки гранту Національного фонду досліджень України 2020.02/0406 "Магнітні індикатори палеокліматичних змін у відкладах лесово-ґрунтової формації України".

Список використаних джерел

Бахмутов, В., Мельник, Г., Главацький, Д., & Поляченко, Є. (2023). Екскурси геомагнітного поля хрону Брюнес. Ч. 1: Історичний огляд та сучасний стан досліджень. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія,* 4(103), 49–54.

Бахмутов, В., & Главацкий, Д. (2016). Проблемы магнитостратиграфии плейстоценовых лессово-почвенных отложений юга Украины. *Геофизический журнал*, 38(4), 59–74.

Бахмутов, В. Г., Главацкий, Д. В., Веклич, Ю. М., Шпыра, В. В., & Якухно, В. И. (2021). Граница Матуяма–Брюнес в лессово-почвенном разрезе Долинское, южная Украина. *Геофизический журнал,* 43(5), 95–110.

Большаков, В. А. (1995). Палеомагнитная запись геомагнитных экскурсов и вторичная намагниченность пород. *Физика Земли*, 1, 66–70.

Большаков, В. А. (2004). Определение климатостратиграфического положения инверсии Матуяма–Брюнес в отложениях лёссовой формации как комплексная проблема наук о Земле. *Физика Земли*, 12, 58–76.

Большаков, В. А. (2007). Геомагнитные экскурсы – надежное средство корреляции геологических отложений? *Физика Земли,* 9, 68–78.

Главацкий, Д. В, Степанчук, В. Н, Кузина, Д. М., Поляченко, Е. Б., Шпыра, В. В., Скарбовийчук, Т. В., Якухно, В. И., & Бахмутов, В. Г. (2021). Петромагнитные и палеомагнитные исследования лессово-почвенных разрезов – стоянок нижнего палеолита в долине Южного Буга (Меджибож, Головчинцы). *Геофизический журнал,* 43(1), 3–37.

Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, I. (2023). Magnetostratigraphy of the Pleistocene loess-palaeosol sequences in Ukraine and Moldova: a historical overview and recent developments. *Geological Quarterly,* 67(4), 35.

Bakhmutov, V. G., Kazanskii, A. Yu., Matasova, G. G., & Glavatskii, D. V. (2017). Rock Magnetism and Magnetostratigraphy of the Loess-Sol Series of Ukraine (Roksolany, Boyanychi, and Korshev Sections). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53(6), 65–86.

Boguckyj, A. B., Łanczont, M., Łącka, B., Madeyska, T., & Nawrocki, J. (2009). Quaternary sediment sequence at Skala Podil'ska, Dniester River basin (Ukraine): Preliminary results of multi-proxy analyses. *Quaternary International*, 198, 173–194.

Bolshakov, V. A. (2017). The use of the rock magnetic and paleomagnetic data for the loess plateau deposits in China for their climatologic and chronologic correlation to the oxygen isotopic timescale. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53, 293–310.

Bondar, K., & Ridush, B. (2015). Rockmagnetic and palaeomagnetic studies of unconsolidated sediments of Bukovynka Cave (Chernivtsi region, Ukraine). *Quaternary International,* 357, 125–135.

Channell, J. E. T., & Vigliotti, L. (2019). The role of geomagnetic field intensity in Late Quaternary evolution of humans and large mammals. *Reviews of Geophysics*, 57, 709-738.

Chen, J., Kravchinsky, V. A., & Liu, X. (2015). The 13 million year Cenozoic pulse of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 431, 256–263.

Cooper, A., Turney, C. S. M., Palmer, J., Hogg, A., McGlone, M., Wilmshurst J., Lorrey, A. M., Heaton, T. J., Russell, J. M., McCracken, K., Anet, J. G., Rozanov, E., Friedel, M., Suter, I., Peter, T., Muscheler, R., Adolphi, F., Dosseto, A., Faith, J.T., Fenwick, P., Fogwill, C.J., Hughen, K., Lipson, M., Liu, J., Nowaczyk, N., Rainsley, E., Ramsey, C. B., Sebastianelli, P., Souilmi, Y., Stevenson, J., Thomas, Z., Tobler, R., & Zech, R. (2021). A global environmental crisis 42,000 years ago. *Science*, 371, 811–818. https://doi.org/10.1126/science.abb8677.

Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental magnetism*. Academic Press

Fang, X. M., Li., J. J., Van der Voo, R., MacNiocaill, C., Dai, R. X., Kemp, R. A., Derbyshire, E., Cao, J. X., Wang, J. M., & Wang, G. (1997). A record of the Blake event during the last interglacial paleosol in the western Loess Plateau of China. *Earth and Planetary Science Letters*, 146, 73–82.

Gao, J., Korte, M., Panovska, S., Rong, Z., & Wei, Y. (2022). Effects of the Laschamps excursion on geomagnetic cutoff rigidities. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23, e2021GC010261.

Hawks, J. (2021). Comment on "A global environmental crisis 42,000 years ago". *Science*, 374(6570).

Hlavatskyi, D. V., Gerasimenko, N. P., Bakhmutov, V. G., Bonchkovskyi, O. S., Poliachenko, I. B., Shpyra, V. V., Mychak, S. V., Kravchuk, I. V., & Cherkes, S. I. (2021). Significance of the Ukrainian loess-palaeosol sequences for Pleistocene climate reconstructions: rock magnetic, palaeosol and pollen proxies. *Geophysical Journal*, 43(3), 3–26.

Hlavatskyi, D., & Bakhmutov, V. (2021). Early–Middle Pleistocene Magnetostratigraphic and Rock Magnetic Records of the Dolynske Section (Lower Danube, Ukraine) and Their Application to the Correlation of Loess–Palaeosol Sequences in Eastern and South-Eastern Europe. *Quaternary*, 4, 43.

Hlavatskyi, D. V. (2019). Refined magnetostratigraphic position of the Shyrokyne unit in loess sequences from Central Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(2), 301–312.

Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2019). Magnetostratigraphy of the key loess-palaesol sequence at Roxolany (Western Black Sea region). In: D. Nurgaliev, V. Shcherbakov, A. Kosterov, S. Spassov (Eds) Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism. (pp. 371-382). Springer Geophysics. Springer, Cham.

Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2020). Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the best developed Pleistocene loess-palaeosol sequences of Ukraine: implications for correlation and proposed chronostratigraphic models. *Geological Quarterly*, 64(3), 723–753.

Jin, C., Liu, Q., Xu, D., Sun, J., Li, C., Zhang, Y., Han, P., & Liang, W. (2019). A new correlation between Chinese loess and deep-sea δ18O records since the middle Pleistocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 411–454.

Kilifarska, N.A., Bakhmutov, V. G., & Melnyk, G. V. (2020) *The hidden link between Earth's magnetic field and climate*. Elsevier.

Laj, C., Channell, J. E. T., & Kissel, C. (2021). Magnetostratigraphy: From a Million to a Thousand Years. In Ramstein, G., Landais, A., Bouttes, N., Sepulchre, P., Govin, A. (eds). Paleoclimatology. Frontiers in Earth Sciences. Springer, Cham.

Łanczont, M., Madeyska, T., Bogucki, A., Sytnyk, O., Kusiak, J., Frankowski, Z. Komar, M., Nawrocki, J., & Żogała, B. (2014). Stratigraphic position and natural environment of the oldest Middle Palaeolithic in central Podolia, Ukraine: New data from the Velykyi Glybochok site. *Quaternary International*, 326–327, 191–212.

Łanczont, M., Madeyska, T., Sytnyk, O., Bogucki, A., Komar, M., Nawrocki, J., Hołub, B., & Mroczek, P. (2015). Natural environment of MIS 5 and soil catena sequence along a loess slope in the Seret River valley: Evidence from the Pronyatyn Palaeolithic site (Ukraine). *Quaternary International*, 365, 74–97.

Liu, Q., Hu, P., Jiang, Z., Ge, K., & Roberts, A. (2015). Magnetostratigraphy of Chinese loess–paleosol sequences. *Earth-Science Reviews*, 150, 139–167.

Nawrocki, J., Boguckyj, A., & Łanczont, M. (2007). Palaeomagnetic studies of the loess-palaeosol sequence from the Kolodiiv section (East Carpathian Fore land, Ukraine). *Geological Quarterly*, 51(2), 161–166.

Nawrocki, J., Bogucki, A., Łanczont, M., Werner, T., Standzikowski, K. & Pańczyk, M. (2018). The Hilina Pali palaeomagnetic excursion and possible self-reversal in the loess from western Ukraine. *Boreas*, 47, 954–966.

Orgeira, M. J., Sinito, A. M., & Compagnucci, R.H. (2016). The Influence of the Geomagnetic Field in Climate Changes. In: Gasparini, G., Rabassa, J., Deschamps, C., Tonni, E. (eds). Marine Isotope Stage 3 in Southern South America, 60 KA B.P.-30 KA B.P. Springer Earth System Sciences. Springer, Cham.

Shcherbakova, V. V, Bakhmutov, V. G., Thallner, D., Shcherbakov, V. P., Zhidkov, G. V., & Biggin, A. J. (2020) Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran. *Geophysical Journal International,* 220(3). P.1928–1946.

Snowball, I. (2018). Is the Hilina Pali 'palaeomagnetic excursion' becoming another example of the reinforcement syndrome? A comment inspired by Nawrocki et al. (2018). *Boreas*, 47, 967–968.

Sümegi, P., Gulyás, S., Molnár, D., Sümegi, B. P., Almond, P. C., Vandenberghe, J., Zhou, L., Pál-Molnár, E., Törőcsik, T., Hao, Q., Smalley, I., Molnár, M., & Marsi, I. (2018). New chronology of the best developed loess/paleosol sequence of Hungary capturing the past 1.1 ma: Implications for correlation and proposed pan-Eurasian stratigraphic schemes. *Quaternary Science Reviews*, 191, 144–166.

Sun, Y. B., Qiang, X. K., Liu, Q. S., Bloemendal, J., & Wang, X. L. (2013). Timing and lock-in effect of the Laschamp geomagnetic excursion in Chinese Loess. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems,* 14, 4952–4961.

Suter, I., Zech, R., Anet, J.G., & Peter, T. (2014). Impact of geomagnetic excursions on atmospheric chemistry and dynamics. *Climate of the Past*, 10, 1183–1194.

Zhu, R. X., Zhang, R., Deng, C. L., Pan, Y. X., Liu, Q. S., & Sun, Y. B. (2007). Are Chinese loess deposits essentially continuous? *Geophysical Research Letters,* 34(17).

Zhu, R. X., Zhou, L. P., Laj, C., Mazaud, A., & Ding, Z.L. (1994). The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess. *Geophysical Research Letters,* 21(8), 697–700.

References

Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, I. (2023). Magnetostratigraphy of the Pleistocene loess-palaeosol sequences in Ukraine and Moldova: a historical overview and recent developments. *Geological Quarterly*, 67(4), 35. https://dx.doi.org/10.7306/gq.1705.

Bakhmutov, V., Melnyk, G., Hlavatskyi, D., & Poliachenko I. (2023). Geomagnetic field excursions of the Brunhes chron. P.1: a historical overview and current state of research. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(103), 49–54. https://doi.org/10.17721/1728-2713.103.05 [in Ukrainian].

Bakhmutov, V. G., & Hlavatskyi, D. V. (2016). Problems of magnetostratigraphy of Pleistocene loess-soil deposits in the South of Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal,* 38(4), 59–75. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107801 [in Russian].

Bakhmutov, V. G., Hlavatskyi, D. V., Veklych, Y. M., Shpyra, V. V., & Yakukhno, V. I. (2021). The Matuyama–Brunhes boundary in the loess-

palaeosol sequence of Dolynske, southern Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(5), 95–110. https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244065 [in Russian].

Bakhmutov, V. G., Kazanskii, A. Yu., Matasova, G. G., & Glavatskii, D. V. (2017). Rock Magnetism and Magnetostratigraphy of the Loess-Sol Series of Ukraine (Roksolany, Boyanychi, and Korshev Sections). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53(6), 65–86. https://doi.org/10.1134/S1069351317050020.

Boguckyj, A. B., Łanczont, M., Łącka, B., Madeyska, T., & Nawrocki, J. (2009). Quaternary sediment sequence at Skala Podil'ska, Dniester River basin (Ukraine): Preliminary results of multi-proxy analyses. *Quaternary International*, 198, 173–194. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.05.010.

Bolshakov, V. A. (1995). Paleomagnetic record of geomagnetic episodes and secondary magnetization of rocks. *Fizika Zemli*, 1, 66–70 [in Russian].

Bolshakov, V. A. (2004). Determination of climate-stratigraphical position of Matuyama-Brunes inversion in loess formation sediments as a complex problem. *Fizika Zemli*, 12, 58–76 [in Russian].

Bolshakov, V. A. (2007). Are geomagnetic episodes reliable for geological sediments correlation? *Fizika Zemli*, 9, 68–78 [in Russian].

Bolshakov, V. A. (2017). The use of the rock magnetic and paleomagnetic data for the loess plateau deposits in China for their climatologic and chronologic correlation to the oxygen isotopic timescale. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53, 293–310. https://doi.org/10.1134/S1069351317020033.

Bondar, K., & Ridush, B. (2015). Rockmagnetic and palaeomagnetic studies of unconsolidated sediments of Bukovynka Cave (Chernivtsi region, Ukraine). *Quaternary International*, 357, 125–135. https://doi.org/10.1016 /j.quaint.2014.04.025.

Channell, J. E. T., & Vigliotti, L. (2019). The role of geomagnetic field intensity in Late Quaternary evolution of humans and large mammals. *Reviews of Geophysics*, 57, 709-738. https://doi.org/10.1029/2018RG000629.

Chen, J., Kravchinsky, V. A., & Liu, X. (2015). The 13 million year Cenozoic pulse of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 431, 256–263. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.09.033.

Cooper, A., Turney, C. S. M., Palmer, J., Hogg, A., McGlone, M., Wilmshurst J., Lorrey, A. M., Heaton, T. J., Russell, J. M., McCracken, K., Anet, J.G., Rozanov, E., Friedel, M., Suter, I., Peter, T., Muscheler, R., Adolphi, F., Dosseto, A., Faith, J.T., Fenwick, P., Fogwill, C.J., Hughen, K., Lipson, M., Liu, J., Nowaczyk, N., Rainsley, E., Ramsey, C. B., Sebastianelli, P., Souilmi, Y., Stevenson, J., Thomas, Z., Tobler, R., & Zech, R. (2021). A global environmental crisis 42,000 years ago. *Science*, 371, 811–818. https://doi.org/10.1126/science.abb8677.

Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics.* Academic Press.

Fang, X. M., Li., J .J., Van der Voo, R., MacNiocaill, C., Dai, R. X., Kemp, R. A., Derbyshire, E., Cao, J. X., Wang, J. M., & Wang, G. (1997). A record of the Blake event during the last interglacial paleosol in the western Loess Plateau of China. *Earth and Planetary Science Letters*, 146, 73–82. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(96)00222-1.

Gao, J., Korte, M., Panovska, S., Rong, Z., & Wei, Y. (2022). Effects of the Laschamps excursion on geomagnetic cutoff rigidities. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23, e2021GC010261. https://doi.org/10.1029 /2021GC010261.

Hawks, J. (2021). Comment on "A global environmental crisis 42,000 years ago". *Science*, 374(6570). https://doi.org/10.1126/science.abh1878eabh1878.

Hlavatskyi, D. V., Gerasimenko, N. P., Bakhmutov, V. G., Bonchkovskyi, O. S., Poliachenko, I. B., Shpyra, V. V., Mychak, S. V., Kravchuk, I. V., & Cherkes, S. I. (2021). Significance of the Ukrainian loess-palaeosol sequences for Pleistocene climate reconstructions: rock magnetic, palaeosol and pollen proxies. *Geophysical Journal*, 43(3), 3–26. https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236378.

Hlavatskyi, D., & Bakhmutov, V. (2021). Early–Middle Pleistocene Magnetostratigraphic and Rock Magnetic Records of the Dolynske Section (Lower Danube, Ukraine) and Their Application to the Correlation of Loess–Palaeosol Sequences in Eastern and South-Eastern Europe. *Quaternary*, 4, 43. https://doi.org/10.3390/quat4040043.

Hlavatskyi, D., Stepanchuk, V., Kuzina, D., Poliachenko, I., Shpyra, V., Skarboviychuk, T., Yakukhno, V., & Bakhmutov, V. (2021). Rock magnetic and palaeomagnetic studies of loess-palaesol sections – Lower Palaeolithic sites within the Southern Bug Valley (Medzhybizh, Holovchyntsi). *Geophysical Journal*, 43(1), 3–37. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225539 [in Russian].

Hlavatskyi, D.V. (2019). Refined magnetostratigraphic position of the Shyrokyne unit in loess sequences from Central Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(2), 301–312. https://doi.org/10.15421/111930.

Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2019). Magnetostratigraphy of the key loess-palaesol sequence at Roxolany (Western Black Sea region). In: D. Nurgaliev, V. Shcherbakov, A. Kosterov, S. Spassov (Eds). Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism. (pp. 371–382). Springer Geophysics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90437-5_26.

Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2020). Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the best developed Pleistocene loess-palaeosol sequences of Ukraine: implications for correlation and proposed chronostratigraphic models. *Geological Quarterly*, 64(3), 723–753. https://gq.pgi.gov.pl/article/view/26160.

Jin, C., Liu, Q., Xu, D., Sun, J., Li, C., Zhang, Y., Han, P., & Liang, W. (2019). A new correlation between Chinese loess and deep-sea δ18O records since the middle Pleistocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 411–454. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.022.

Kilifarska, N. A., Bakhmutov, V. G., & Melnyk, G. V. (2020). *The hidden link between Earth's magnetic field and climate.* Elsevier.

Laj, C., Channell, J. E. T., & Kissel, C. (2021). Magnetostratigraphy: From a Million to a Thousand Years. In Ramstein, G., Landais, A., Bouttes, N., Sepulchre, P., Govin, A. (Eds.). Paleoclimatology. Frontiers in Earth Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24982-3_7.

Łanczont, M., Madeyska, T., Bogucki, A., Sytnyk, O., Kusiak, J., Frankowski, Z. Komar, M., Nawrocki, J., & Żogała, B. (2014). Stratigraphic position and natural environment of the oldest Middle Palaeolithic in central Podolia, Ukraine: New data from the Velykyi Glybochok site. *Quaternary International*, 326–327, 191–212. https://doi.org/10.1016 /j.quaint.2013.08.045.

Łanczont, M., Madeyska, T., Sytnyk, O., Bogucki, A., Komar, M., Nawrocki, J., Hołub, B., & Mroczek, P. (2015). Natural environment of MIS 5 and soil catena sequence along a loess slope in the Seret River valley: Evidence from the Pronyatyn Palaeolithic site (Ukraine). *Quaternary International*, 365, 74–97. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.05.035.

Liu, Q., Hu, P., Jiang, Z., Ge, K., & Roberts, A. (2015). Magnetostratigraphy of Chinese loess–paleosol sequences. *Earth-Science Reviews*, 150, 139–167. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.009.

Nawrocki, J., Bogucki, A., Łanczont, M., Werner, T., Standzikowski, K., & Pańczyk, M. (2018). The Hilina Pali palaeomagnetic excursion and possible self-reversal in the loess from western Ukraine. *Boreas*, 47, 954–966. https://doi.org/10.1111/bor.12305. ISSN 0300-9483

Nawrocki, J., Boguckyj, A., & Łanczont, M. (2007). Palaeomagnetic studies of the loess-palaeosol sequence from the Kolodiiv section (East Carpathian Fore land, Ukraine). *Geological Quarterly*, 51(2), 161–166.

Orgeira, M. J., Sinito, A. M., & Compagnucci, R. H. (2016). The Influence of the Geomagnetic Field in Climate Changes. In: Gasparini, G., Rabassa, J., Deschamps, C., Tonni, E. (eds). Marine Isotope Stage 3 in Southern South America, 60 KA B.P.-30 KA B.P. Springer Earth System Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40000-6_4.

Shcherbakova V. V, Bakhmutov V. G., Thallner D., Shcherbakov V. P., Zhidkov G. V., & Biggin A. J. (2020) Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran. *Geophysical Journal International*. 220(3), 1928–1946. https://doi.org/10.1093/gji/ggz566.

Snowball, I. (2018). Is the Hilina Pali 'palaeomagnetic excursion' becoming another example of the reinforcement syndrome? A comment inspired by Nawrocki et al. (2018*). Boreas*, 47, 967–968. https://doi.org/10.1111/bor.12329.

Sümegi, P., Gulyás, S., Molnár, D., Sümegi, B.P., Almond, P.C., Vandenberghe, J., Zhou, L., Pál-Molnár, E., Törőcsik, T., Hao, Q., Smalley, I., Molnár, M., & Marsi, I. (2018). New chronology of the best developed loess/paleosol sequence of Hungary capturing the past 1.1 ma: Implications for correlation and proposed pan-Eurasian stratigraphic schemes. *Quaternary Science Reviews*, 191, 144–166. https://doi.org/10.1016 /j.quascirev.2018.04.012.

Sun, Y. B., Qiang, X. K., Liu, Q. S., Bloemendal, J., & Wang, X. L. (2013). Timing and lock-in effect of the Laschamp geomagnetic excursion in Chinese Loess. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14, 4952–4961. https://doi.org/10.1002/2013GC004828.

Suter, I., Zech, R., Anet, J. G., & Peter, T. (2014). Impact of geomagnetic excursions on atmospheric chemistry and dynamics. *Climate of the Past*, 10, 1183–1194. https://doi.org/10.5194/cp-10-1183-2014.

Zhu, R. X., Zhang, R., Deng, C. L., Pan, Y. X., Liu, Q. S., & Sun, Y. B. (2007). Are Chinese loess deposits essentially continuous? *Geophysical Research Letters*, 34(17). https://doi.org/10.1029/2007GL030591.

Zhu, R. X., Zhou, L. P., Laj, C., Mazaud, A., & Ding, Z. L. (1994). The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess. *Geophysical Research Letters*, 21(8), 697–700. https://doi.org/10.1029/94GL00532.

Отримано редакцією журналу / Received: 02.09.24
Прорецензовано / Revised: 13.10.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Volodymyr BAKHMUTOV[1], DSc (Geol.), Prof., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3804-9953
e-mail: bakhmutovvg@gmail.com

Galyna MELNYK[1], PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3609-1181
e-mail: melnykgv@gmail.com

Dmytro HLAVATSKYI[1], PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com

Ievgen POLIACHENKO[1], PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
e-mail: poliachenkoib@gmail.com

[1]Institute of Geophysics by S.I. Subbotin name, NAS of Ukrane, Kyiv, Ukraine

GEOMAGNETIC FIELD EXCURSIONS OF THE BRUNHES CHRON. PART 2: MAGNETOSTRATIGRAPHY OF SUBAERIAL DEPOSITS AND IMPACT ON THE ENVIRONMENT

Background. ***The current state and problems in the study of the Brunhes chron geomagnetic excursions have been discussed in the part 1. In particular, Laschamp (41 thousand years ago), Blake (114 thousand years ago), Iceland Basin (188 thousand years ago) excursions are considered as the most reliable geomagnetic events. The second part of the article provides a detailed overview of the application of the Brunhes chron geomagnetic excursions in the correlation of subaerial deposits of the Pleistocene, in particular loess-palaeosol sequences of Ukraine and nearby European countries.***

Methods. ***Studies of loess-palaeosol deposits were carried out by paleomagnetic and rock magnetic methods. The calculation of the characteristic component of magnetization was performed by statistical methods of spherical data.***

Results. ***New results of the study of the Roksolany loess-soil section, which supplement the previous magnetostratigraphic scale, are presented. In the section, an excursion of reversed polarity at the level of the Lower Zavadivka pedocomplex (S4; correlative of MIS 11) has been revealed, which, in our interpretation, corresponds to the Unnamed event of 430 thousand years ago, described earlier in the Vyazivok and Medzhybizh loess sections. Recent studies of the impact of excursions on environmental changes, for instance, on palaeoecological and climatic changes during the Last Glacial Period, are discussed.***

Conclusions. ***Unnamed (430,000 years ago) and Big Lost (540,000 years ago) excursions have been manifested in resent studies of the loess-palaeosol sequences of Ukraine. The absence of other well-documented excursions in Upper Pleistocene loess-soil deposits can be explained by sampling gaps, stratigraphic hiatuses in sediment accumulation, peculiarities of the paleomagnetic "records" and the insufficient study of the magnetic mineralogy of these deposits. The impact of geomagnetic field inversions and excursions on environmental changes is a debatable issue that requires further research, especially in terms of mechanisms of such effects. Since many researchers emphasize the role of atmospheric ozone in climate and environmental changes, the mechanism proposed in (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020) may explain the relationship of geomagnetic field and climate changes.***

Keywords: ***geomagnetic field inversions and reversals, magnetostratigraphy, loess-palaeosol sequences, environmental changes, Pleistocene.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 550.552.53.553
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.03

Ivan KARPENKO, PhD (Geol.)
ORCID ID: 0000-0001-7753-9010
e-mail: karpenko.i.geoscience@gmail.com
M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and
Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
NJSC "Naftogaz of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Ihor ISCHENKO, DSc (Geol.)
e-mail: Il_Ischenko@gmail.com
NJSC "Naftogaz of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Oleksii KARPENKO, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5780-0418
e-mail: okarpenko.geol@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND THERMAL MATURITY OF THE UPPER DEVONIAN ROCKS (DNIEPER-DONETS BASIN) ACCORDING TO ROCK-EVAL PYROLYSIS DATA (EXPLORATION DRILLING)

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Background. *In the Dnieper-Donets Basin (DDB), Devonian deposits are a very interesting object of hydrocarbon system research – from the initial stage of hydrocarbon generation to the stage of formation of oil and gas deposits. The presence of sedimentary layers enriched with scattered organic matter determines the oil and gas generation potential of the deposits. The article presents the results of laboratory studies of Upper Devonian rocks performed on the Rock-Eval pyrolytic tool in order to assess their thermal maturity and degree of hydrocarbon generation.*

Methods. *Laboratory studies were carried out by the method of pyrolysis of rock samples (Rock-Eval) with the determination of a number of parameters that allow for the assessment of thermal maturity, the type of organic matter (kerogen) and the coefficient of organic matter transformation. Data processing was performed using the methods of mathematical statistics.*

Results. *An important result of the research is the established regularity that shales and limestones with an increased content of organic carbon (TOC) of the Famennian layer from between-salt strata in this part of the DDB are already in the active phase of oil generation and belong to oil-source rocks. Precisely in this part of the Dnieper-Donets depression the main explored reserves of liquid hydrocarbons in the Eastern region are concentrated.*

Conclusions. *Generalized conclusion based on the results of the above studies: most samples of shales (argillites) and limestones have quite high concentrations of organic carbon; the thermal maturity of the rocks for 63 % of the samples corresponds to the "oil window"; all four types of kerogen are present in the rocks; the best oil-generating properties are characteristic of shales from between-salt strata; also, these shales have the maximum degree of realization of the generating potential TRI – more than 0.3 at depths of 4,700 m. The results of the above studies indicate that the shales and limestones of the Frasnian and Famennian layers from the studied deposits can be considered as potential oil-source rocks.*

Keywords: *Devonian, kerogen, pyrolysis, sourse rock, hydrocarbons, Dnieper-Donetsk basin.*

Background

The Dnieper-Donets avlakogen is known not only as a large reservoir of oil and gas fields, but also as a unique training ground for studying the formation processes of hydrocarbon deposits, and of all known types. This is exactly what was emphasized when writing this article. The material for the research was the results of laboratory analyzes of rock samples of predominantly clay composition, from the core obtained during the drilling of exploratory wells. The geography of the wells location covers a number of oil and gas producing areas of the Dnieper-Donets basin – from the northwest to its southern part. Materials – the results of laboratory analyzes that were the basis of this study are unique, new and therefore represent an undoubted interest for specialists dealing with issues of exploratory oil and gas geology. Core samples of the Upper Devonian, Famennian and Frasnian stages were taken from the sections of deep exploratory wells. The issue of selecting rocks from this stratigraphic interval is based on the well-known assumptions that rock strata were formed in the Devonian period, which later were regionally (all over the planet) one of the main "kitchens" where hydrocarbons were generated for many oil and gas deposits. A huge number of publications on this topic prompted the author's team to be engaged in specific research with the aim of assessing the oil and gas generation potential of mainly clayey rocks from certain areas of the DDB. The results of "fresh" laboratory studies performed on a modern Rock-Eval pyrolytic tool allowed an independent (unbiased) assessment of the generation potential of rocks from the Upper Devonian deposits.

Regarding the location (or vertical differentiation) of the Upper Devonian deposits, a working scheme was adopted in which the following main litho-stratigraphic complexes of the southern zone of the DDB are distinguished (Eisenberg, Berchenko, & Brazhnikova, 1988; Khomenko, 1986; Menning et al., 2006):

- the under salt-bearing complex is stratigraphically formed by the Givetian and Eifelian stratigraphic complexes (D_2ef-zv, 393,3–382,7 Ma) in the northwestern part of the basin, and within other areas by the Upper Frasnian Semilut horizon (D_3fr_3sm, 380, 2–375,5 Ma) and the Voronezh suite (D_3fr_3vr, 377,0–378,0 Ma);
- lower salt-bearing complex – stratigraphically formed by the Upper Frasnian, Lievean and Yevlanian horizons (D_3fr_3ev-lv, 378,8–375,0 Ma);
- between-salt complex (D_3fm_1zd-el, 372,0–367,0 Ma) formed by the Lower Famennian Zadonian and Jelets horizons;
- upper salt-bearing complex – formed by the Lower Famennian Yelets horizon and the Middle Famennian Lebedyan layer (D_3fm_2dn-lb, 367–365 Ma);
- over salt complex – formed by the Middle Famenian Dankovo-Lebedyan (D_3fm_2dn-lb) and Upper Famenian Ozersky-Khovansky (D_3fm_2oz-hv) horizons (360,0–359,5 Ma).

In the work (Karpenko, 2018), it is noted that seven oil fields have been discovered in the Devonian deposits in the northern pre-board zone: Yasenivske, Sukhivske, Zahidno-Koziivske, Koziivske, Bugruvativske, Golikyvske, Radianske. It is believed that the hydrocarbon deposits were formed by subhorizontal migration flows from the deeper part of the basin from the Devonian oil-source strata. They are associated with tectonically shielded deposits in over salt-bearing Upper Famennian deposits (West Koziivske, Yasenivske, Sukhivske deposits); lithologic-shielded deposit in breccia at the salt dome (Romenske); by fields of hydrocarbons in between-salt Devonian deposits (Bugruvativske, Holikivske); deposits in the Carboniferous and between-salt deposits of the hydrocarbons (Koziivske). At the same time, only one oil and gas condensate field (Lychkivske) and two gas-condensate fields (Bogatoyske and Ryaskivske) are known in Devonian deposits within the southern border zone. The Lychkivske gas condensate field is represented by 3 isolated deposits within the uplifted block surrounded by several subvertical tectonic faults. It is believed that the deposits were also formed by subhorizontal migration flows of hydrocarbons from the deeper part of the basin from the Devonian oil-source strata (Karpenko, 2018).

The idea of writing this article is to publish the obtained new results regarding the assessment of the generation possibilities of potential oil and gas source strata of the Upper Devonian in different sections of the DDB, taking into account their stratigraphic, structural and geographical location. The analysis of the results of core samples geochemical studies at the Rock-Eval pyrolytic tool has been renewed.

The main publications on the topic of the research, in which the results of study of the Devonian sediments of the Dnieper-Donets basin from the point of view of their oil and gas potential or as potential oil and gas source rocks, should be included (Ratnayake, Kularathne, & Sampei, 2018; Eisenberg, Berchenko, & Brazhnikova, 1988; Sachsenhofer et al., 2002; Sachsenhofer et al., 2010; Misch et al., 2015; Stryzhak, & Korzhnev, 2012; Karpenko, 2018). The detailed work on the history of the search for oil and gas accumulations in the Devonian deposits of the Dnieper-Donets depression, prospects for the discovery of hydrocarbon deposits belong to the authors (Stryzhak, & Korzhnev, 2012). It contains a detailed analysis of the negative results of search works over a long period of time. The significant contribution of many researchers to establishing the history of the formation and development of Devonian deposits in the DDB is also appreciated. Directions for further research and prospecting work are indicated. The conclusion of the authors of this work contains the following. To date, in the sedimentary complex of the Devonian deposits of the northwestern Dnieper-Donets avlakogen, industrial deposits of hydrocarbons have not been identified. The degree of discovery of the Devonian deposits of this area by parametric and exploratory drilling is relatively low. Obviously, the establishment of regularities of the distribution of explosive deposits in Devonian deposits will be facilitated by the gradual increase in drilling volumes and the receipt of relevant geological and geophysical information. Summarizing the conclusions of most researchers, we note that the main prospects of the territory of the northwest of the Dnieper-Donets avlakogen should be connected with the under-salt Zadonsko-Yeletsky strata. This is evidenced by the overwhelming number of oil and gas occurrences, favorable thermobaric, hydrogeological, shielding (lithological and tectonic) conditions for the formation and preservation of hydrocarbon deposits, the presence of biogenic carbonate and terrigenous reservoirs. The shielding capabilities of the lower (Lievean and Yevlanian) salt-bearing stratum leave certain prospects for the lower salt-bearing as well (Stryzhak, & Korzhnev, 2012). At the same time, it should be noted that the possibility of the existence of non-traditional hydrocarbon deposits in the Devonian sediments is not sufficiently appreciated, despite the fact that in the Devonian period there were favorable conditions for the accumulation and burial of huge masses of organic matter at the regional and planetary level. Which later served as raw material for the generation of hydrocarbons with the migration of the latter into the host strata and into structures of younger orders. Regarding the study of potential oil and gas source strata of the Devonian, it is worth noting the numerous works of Professor R. Sachsenhofer and his colleagues (Sachsenhofer et al., 2002; Sachsenhofer et al., 2010; Misch et al., 2015), Academician O.E. Lukin (Lukin, 2006), (Mykhailov et al., 2014), many other researchers. As a result of extremely heterogeneous genesis, mineral composition and spatial distribution of Devonian sediments (mainly terrigenous type), any additional new information regarding the geological and geochemical features of mudstone-like, organically enriched Devonian sediments (Karpenko, Bashkirov, & Karpenko, 2014), is an undoubted scientific and practical interest in terms of assessing the oil and gas potential of the entire Dnieper-Donetsk basin.

Geological and geochemical features of the research objects. The studied core samples were taken from sections of 9 exploratory and parametric wells. In terms of location, the wells are divided into 2 groups: a) northern ones – tending to the northwestern part of the DDB, closer to the northern side, 7 wells; b) southern – to the central part of the southern board zone of the DDB, 2 wells. In terms of lithology, mainly shales (88 samples), siltstones (2 samples), sandstones (4 samples), interlayering of sandstones and shales (8 samples), limestones (16 samples), interlayering of shales and limestones (2 samples), metasomatites (2 samples). All samples belong to Upper Devonian deposits: – Frasnian layer (D_3f_1-D_3f_2) and Famennian layer (D_3fm_1, D_3fm_2, D_3fm_3). Regarding the main litho-stratigraphic complexes according to the classification (Eisenberg, Berchenko, & Brazhnikova, 1988; Khomenko, 1986; Menning et al., 2006): under-salt complex – 36 samples, lower-salt complex – 2 samples, between-salt complex – 70 samples, over-salt complex – 14 samples. The sampling depths differ significantly in the wells of the northern and southern groups: for the northern group of wells, the average values of depths are 3844 m (2559–5474 m), for the southern group the average values of depths are 2732 m (1695–4171 m).

The Tab. 1 shows the distribution of the main (representative) lithotypes of rocks depending on their location in the Upper Devonian salt-bearing layer of rocks and by stratigraphic affiliation. There are 2 main groups of rocks in the collection: shales (including a core with interlayering of shale and sandstone) and limestones (with a core where there is an interlayering of shale and limestone).

All the above-mentioned lithologic-stratigraphic features of the deposits, their spatial location are important factors that were taken into account during the analysis of the geochemical characteristics of the studied rocks.

Methods

All core samples from the above collection were subjected to a full set of laboratory tests on the Rock-Eval pyrolytic tool in the laboratory of the State Enterprise "Ukrnaukageocentre". Most of the selected mudstone samples (shales) are typical of Upper Devonian deposits. In some of them, during the macro description, the presence of plant remains was found, in some, a characteristic smell of hydrocarbons was observed.

Table 1

Distribution of the main rocks lithotypes in the Upper Devonian salt-bearing layer of rocks *

Placement	D3f2	D3fm1	D3fm2	D3fm3
Over salt			10(sh)	2+2(sh-lm)
Between salt		58(sh)+8(sand+sh)		
Under salt	16(sh)+10(lm)	6(lm)		

* sh – shale; lm – limestone; sh+lm – shale+limestone; sand+lm – sandstone+shale

The main parameters that were obtained during laboratory tests include:

S_1 is a measure of free hydrocarbons (HC), which evaporate from the rock without kerogen cracking (that is, up to a temperature of 280–300 °C). Peak S_1 corresponds to the explosives contained in the rock (mg of HC/g of rock); increases in relation to S_2 with increasing maturity of kerogen.

S_2 is the yield of heavy and light hydrocarbons during kerogen cracking (generated at higher temperatures – up to 550 °C), measured (mg of HC/g of rock). S_2 defines the potential of hydrocarbons generation by modern rock.

$S_1 + S_2$ is a measure of the genetic potential or the total amount of HC that could be generated by the rock (without taking into account the emigration of hydrocarbons from the rock that has already occurred).

S_3 – the amount of CO_2 released as a result of pyrolysis of dispersed organic matter in the temperature range of 300–390 °C; (measured as mg of substance/g of rock).

Tmax is the temperature of the maximum yield of hydrocarbons during kerogen cracking. *Tmax* is a function of the maximum peak temperature of S_2. The degree of catagenetic dosing of organic substances is estimated by the value of *Tmax*.

TPI or $S_1/(S_1+S_2)$, which is called the coefficient of transformation of organic substances; it indicates the amount of rock that has exhausted its generation potential.

TOC is the content of organic carbon in the rock, %.

HI or hydrogen index is the ratio $(S_2/TOC)*100$. High values of this parameter indicate the ability of the rock to generate hydrocarbons, mainly oil.

OI or oxygen index is the ratio $(S_3/TOC)*100$. The ratio of the hydrogen and oxygen indices of the appearance of the kerogen type (taking into account the degree of catagenetic changes that have occurred in the rock) is the Van Krevelen diagram (Tissot, & Welte,1984).

In order to obtain significant results and conclusions, in addition to the construction of "classical" diagrams and histograms of probability distributions of parameter values, methods of mathematical statistics were applied.

Results

The rather diverse composition of the studied samples in terms of their lateral and vertical placement in sedimentary strata, stratigraphic and lithological affiliation requires the introduction of certain restrictions regarding their further use in analytical studies. Thus, unrepresentative collections of individual lithological groups were excluded from the research. Data on all samples of lithotypes from the Upper Devonian deposits were given only on general diagrams (graphs). Tab. 2–3 show the statistical characteristics of the geochemical parameters of the main lithological types.

Fig. 1 shows the distribution of all samples from the collection on the diagram "oxygen-hydrogen indices" *OI-HI*, which is used to determine the transformation of organic matter (OM) or kerogen to one of the 4 generally accepted types. Dotted lines mark typical correlation dependences for individual types of kerogen. As can be seen, in the collection from Upper Devonian deposits there are representatives of all types of kerogen – from type I (marine-lacustrine sapropel OM) to type IV ("sedimentary").

Table 2

Statistical characteristics of geochemical parameters of shales

Parameter	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
Depth, m	88	3644.8	1695.0	5474.0	1038.6
S_1	88	0.4	0.0	4.4	0.8
S_2	88	2.1	0.2	37.1	5.9
S_3 (CO_2)	88	0.3	0.0	2.6	0.4
Tmax, °C	88	435.2	417.0	463.0	10.8
HI	88	51.4	4.6	447.6	63.2
OI	88	17.4	0.7	138.0	24.2
TPI	88	0.2	0.0	0.6	0.1
TOC	88	2.7	0.8	17.2	2.5
S_1+S_2	88	2.4	0.2	40.1	6.4
$(S_1+S_2)/TOC$	88	64.4	6.1	611.3	85.7

Table 3

Statistical characteristics of geochemical parameters of limestones

Parameter	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
Depth, m	16	4152.9	3794.0	4425.0	225.5
S_1	16	0.26	0.02	1.65	0.40
S_2	16	1.23	0.06	4.41	1.41
S_3 (CO_2)	16	0.37	0.05	0.89	0.33
Tmax, °C	16	431.9	406.0	442.0	8.2
HI	16	79.9	3.6	223.3	67.2
OI	16	41.9	1.8	246.9	60.1
TPI	16	0.2	0.1	0.4	0.1
TOC	16	1.5	0.3	3.4	0.9
S_1+S_2	16	1.5	0.1	6.1	1.8
$(S_1+S_2)/TOC$	16	96.0	5.1	256.2	77.3

Table 4

Statistical characteristics of geochemical parameters of samples with layering of sandstones and mudstones

Parameter	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
Depth, m	8	2670.3	2640.0	2711.0	30.3
S_1	8	0.17	0.08	0.57	0.16
S_2	8	1.70	0.92	2.90	0.77
S_3 (CO_2)	8	0.70	0.05	1.46	0.61
Tmax, °C	8	423.8	414.0	433.0	6.4
HI	8	111.7	35.0	237.1	71.6
OI	8	42.0	3.2	91.1	36.7
TPI	8	0.1	0.0	0.2	0.0
TOC	8	1.8	1.2	2.9	0.7
S_1+S_2	8	1.9	1.0	3.5	0.9
$(S_1+S_2)/TOC$	8	123.2	38.6	246.2	79.4

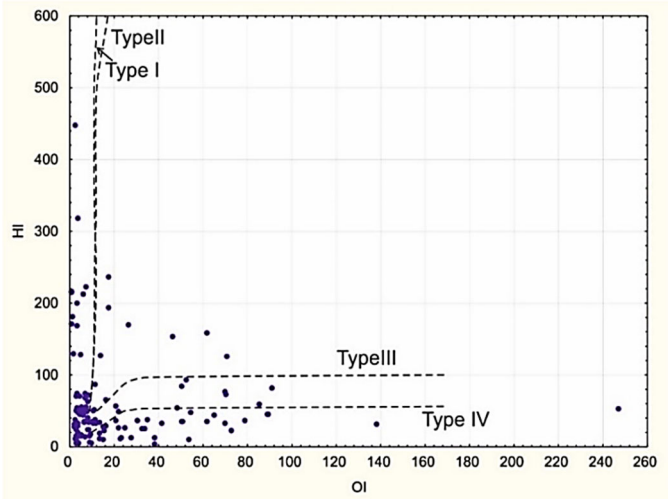


Fig. 1. Classification of kerogen types of sediment core samples using oxygen and hydrogen indices from the studied wells. Modified Van Krevelen diagram (Tissot, & Welte,1984; Ratnayake, Kularathne, & Sampei, 2018)

Traditionally, four types of kerogen are distinguished depending on the content of original organic matter (Tissot, & Welte,1984; Karpenko, Krochak, & Baisarovych, 2017).

***Liptinite (or alginite*) (type 1)** has a high ratio of hydrogen to carbon, but low – oxygen to carbon. It is mainly an oil-generating type, with a significant percentage of production (up to 80 %). It is formed primarily from algae, rich in lipids, which are formed in lagoon and lake environments. Liptinite fluoresces under ultraviolet radiation.

Exinite (type 2) has average values of hydrogen/carbon and oxygen/carbon ratios. This type generates oil and gas, production is 40–50 %. The source of exinite formation is film remains of plants (spores, pollen, soft plant tissues), phytoplankton and bacterial marine microorganisms.

Vitrinite (type 3) has low hydrogen and high – oxygen content, generates small volumes of hydrocarbons, mainly gas. The main source of vitrinite is the remains of higher plants found in coal or carbonaceous rocks. Vitrinite does not fluoresce under ultraviolet radiation, but has an extremely high reflectivity at higher stages of maturation, and therefore, it can be used as an indicator of the degree of maturity of the matter rock.

Inertinite or fusinite (type 4) is a product of any of the above types of kerogen that does not fluoresce under ultraviolet radiation. It is characterized by high carbon content and low hydrogen content. Inertinite has no significant potential for generating oil and gas, which is why it was called "dead carbon".

Under the influence of temperature, large molecules of kerogen disintegrate into smaller molecules of liquid and gaseous hydrocarbons. Undoubtedly, there are many transitional forms (genetic types) of kerogen, which is clearly shown by the scatter of observation points – core measurements in Fig. 1. However, a significant number of rocks that gravitate to the I-II types of kerogen according to the distribution of *OI-HI* indices are distinguished (Fig. 1). It has been established that kerogens of these types are the main "producers" of oil and combustible gas in sedimentary rocks.

Fig. 2 shows the classic "*Tmax-HI*" diagram, which allows estimating the generation potential of kerogen, its genetic type, and establish the degree of catagenetic maturity of rocks.

Because of the uniqueness of this chart, it is possible to estimate the oil and gas generation capabilities of kerogen from a collection of researched samples based on the data of laboratory measurements on the Rock-Eval pyrolytic tool. Vertical lines in Fig. 2 show the conditional *Tmax* limits of the distribution of rocks by thermal maturity (all lithological types of rocks from the collection are given here). The value of *Tmax* correlates well with the vitrinite reflectance *Ro*, which is a recognized characteristic of the degree of maturity of rocks or catagenetic transformation of rocks and organic matter. Thus, the work (Waliczek et al., 2021) gives the equation of 3 regression dependences of the *Ro* coefficient on the *Tmax* value depending on the type of kerogen. For type II kerogen, the equation was calculated (Waliczek et al., 2021):

$$Ro = 0.0112 \cdot Tmax - 4.2072. \quad r = 0.84 \qquad (1)$$

Similar equations are found in other publications, and all of them are quite similar in coefficients, which allows the use of the *Tmax* parameter as a characteristic of the degree of genetic maturity of different types of kerogen. In Fig. 2 more than half of the rock samples belong to the "mature" category, the *Tmax* value of which, according to the Rock-Eval measurement results, is greater than 430 °C. Almost all

samples of this group are within the "oil window". As will be shown later, these samples were mainly taken from the northern group of wells, from the northwestern part of the DDB. According to the value of the *HI* hydrogen index, most of the samples contain type III or even type IV kerogen. A smaller part gravitates towards transitional forms of II-III types. Single samples – with type II kerogen (Fig. 2).

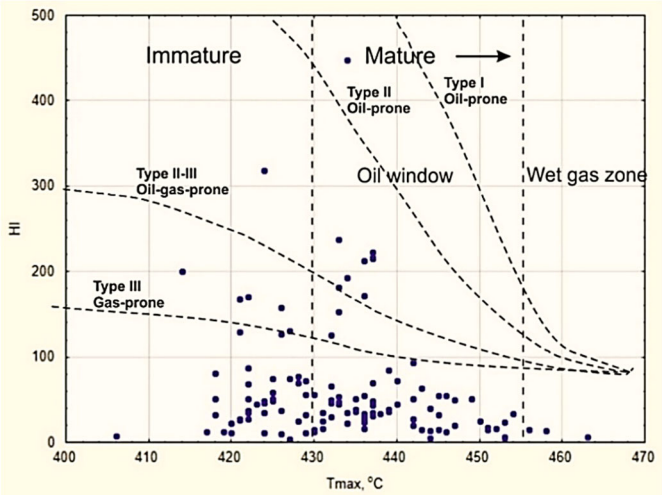


Fig. 2. The distribution of *HI* relative to the *Tmax*, Rock–Eval coefficient, indicates the type of kerogen and the degree of maturity of the potential source rocks. Modified diagram lines by (Ratnayake, Kularathne, & Sampei, 2018)

Fig. 3 shows the histograms of probability distributions of *Tmax* parameters and organic carbon content of *TOC* for the two main lithotypes of rocks in which the highest values of *TOC* content were observed - shales and limestones.

It is expected that the *TOC* organic carbon content in the limestone samples is significantly lower – it practically does not exceed 2 %. In shales, the peak *TOC* content is within 2–4 % (sometimes higher). This may indicate that mudstones here have a good probabilistic oil and gas generating potential (in general). The probability distribution of *Tmax* values indicates approximately the same level of catagenetic transformation of organic matter in limestones and shales. The approximate temperature range of maximum generation for the "oil window" of 430–457 °C (see Fig. 2) is typical for most samples of limestones and mudstones (Fig. 3). However, such conclusions are generalized; they do not take into account the features of the lateral and vertical distribution of carbonate and clay rocks in the studied area. A characteristic of the spatial position of the strata relative to the salt-bearing strata of the Upper Devonian should be added to the stratigraphic affiliation during a detailed analysis of the degree of catagenetic maturity and generational characteristics of the rocks. In Fig. 4 shows a cross-plot of the dependence of the *Tmax* parameter on the depth of mudstones beds, taking into account the position of the latter relative to salt-bearing strata. In the future, we will consider the geochemical features of clay rocks (shales) as the most likely sources of hydrocarbon generation from Upper Devonian deposits. This is also influenced by the fact that mudstones have the most representative sample in our collection compared to other lithological rock types. The lines of the regression equations in Fig. 4 are given for a visual representation of the "behavior" of the *Tmax* parameter with increasing depth and spatial placement of mudstones. Over-salt beds of Famennian shales D_3fm_2 and D_3fm_3 are characterized by slightly increased *Tmax* values at the depths of their occurrence compared to between-salt and under-salt counterparts at approximately the same depths (2000–4000 m).

However, at depths of more than 4,000 m, the degree of catagenetic maturity of rocks is highest in shales of between-salt deposits. The organic matter in all mudstone samples has a degree of maturity that corresponds to the "oil window" of hydrocarbon generation. Kerogen in some samples has a *Tmax* value already in the area of the "gas window" for wet gas (refers to between-salt deposits) (Fig. 4). In general, based on the results of laboratory analyzes of samples from the Upper Devonian sediments, the idea that terrigenous rocks (shales and mudstones with layers of sandstones) from between-salt strata have the greatest generating properties was formed.

The coefficient of transformation of organic matter *TPI*, as it was said, characterizes the degree to which the rock has exhausted its generation potential. In Fig. 5, a general regularity of the increase in the value of *TPI* with increasing depth of shale layers occurrence is observed, regardless of their position relative to salt-bearing strata.

A noticeable increase in this indicator begins at depths greater than 4,200 m. The analysis of the core selection show that all samples marked on the cross-plot deeper than 4,200 m refer to wells from the northwestern part of the DDB. Accordingly, shales with high TOC content of the Famennian layer from between-salt strata in this part of the DDB are already in the active phase of oil generation and belong to oil matter rocks. It is precisely in this part of the Dnieper-Donets depression that the main explored reserves of liquid hydrocarbons in the Eastern region are concentrated.

The results of the studies presented in the article with an assessment of the probable oil generation potential of the Upper Devonian deposits of two parts of the DDB show that the degree of thermal maturity of the kerogen of the rocks depends significantly not only on the depth of occurrence, but also on a number of other factors, such as the lateral placement of the deposits relative to the tectonic elements of the avlacogen, their position relative to salt-bearing strata, from the genetic type of organic matter. In addition, the degree of realization of the generating potential of *TPI* kerogen depends on its degree of maturity (parameter *Tmax*), this is a natural statement (see Fig 6). However, there is a peculiarity of the influence on such a dependence of the position relative to the saline strata: under-salt deposits of limestones and mudstones have increased values of *TPI* relative to over-salt deposits. This is clearly manifested in the *Tmax* range of 430–440 °C – in the left part of the "oil window" of hydrocarbon generation.

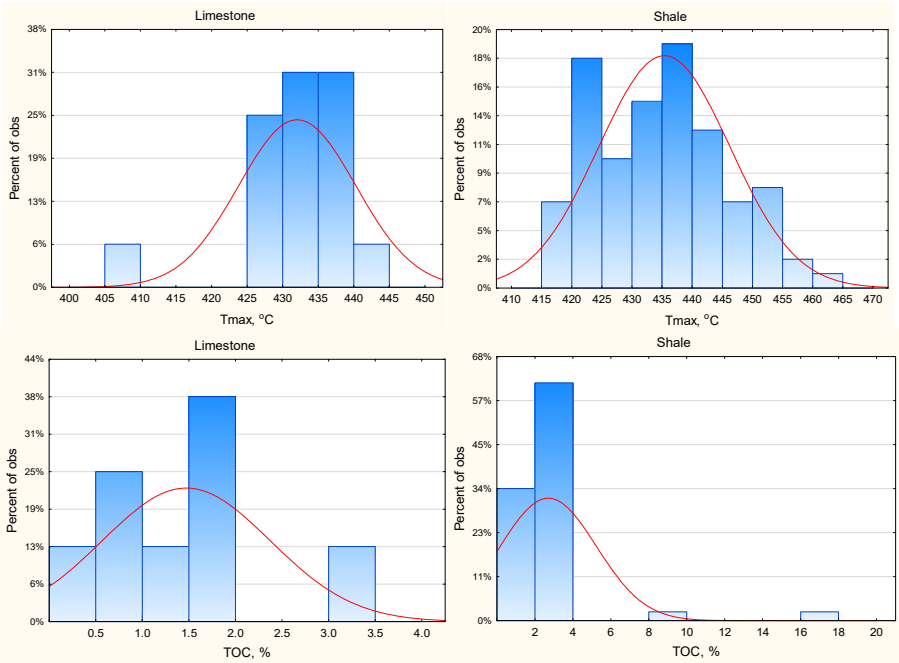


Fig. 3. Probability distribution of *TOC* and *Tmax* values for limestones and shales from the collection. Upper Devonian, Frasnian and Famennian stages

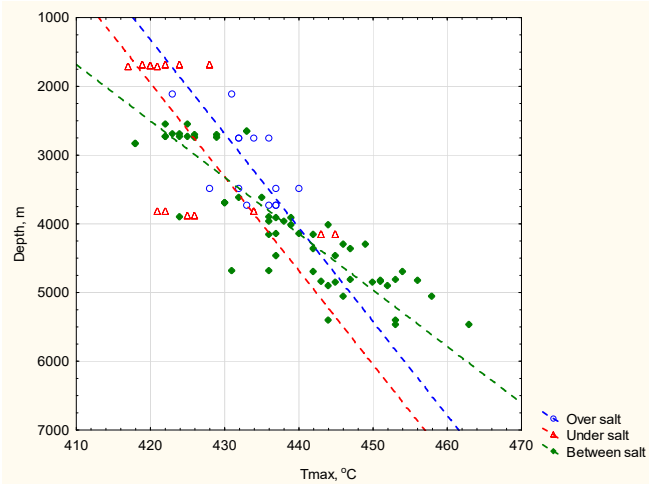


Fig. 4. Dependence of the maximum hydrocarbon generation temperature parameter *Tmax* for shales on the depth of layers and their position relative to salt-bearing strata. Frasnian and Famennian stages

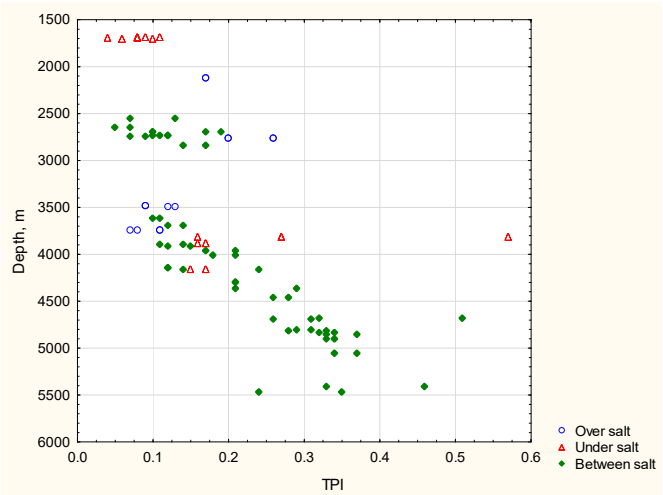


Fig. 5. Dependence of the *TPI* parameter for shales on the depth of sediments and their position relative to salt-bearing strata. Frasnian and Famennian stages

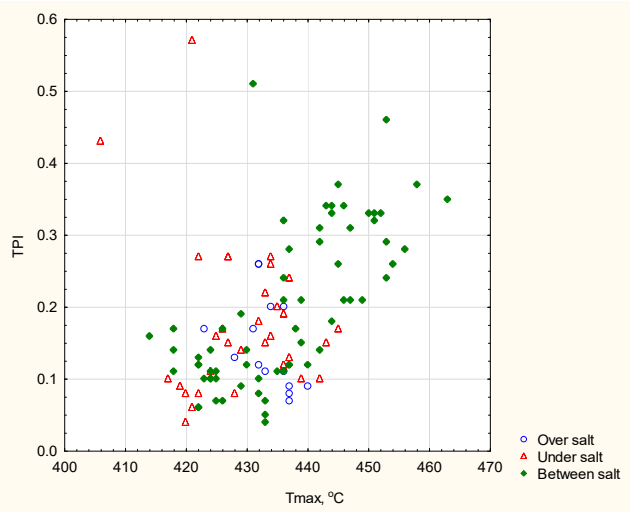


Fig. 6. Dependence of the *TPI* parameter for shales and limestones on the maximum temperature of hydrocarbon generation *Tmax*, taking into account the position of the formations relative to salt-bearing strata. Frasnian and Famennian stages

Discussion and conclusions

The results of the performed geochemical studies of rock samples at the Rock-Eval pyrolytic tool from the Upper Devonian deposits of the northwestern and southern pre-border parts of the DDB made it possible to draw a number of important conclusions. Similar studies of rocks from the oil and gas regions of Ukraine are carried out in limited quantities. Data on the geochemical generation potential of probable oil-bearing strata have always been of increased interest to researchers and practicing geologists. In this collection, there are two main lithological groups of rocks – shales and limestones, in which an increased content of organic carbon *TOC* is observed: average values of *TOC* in shales are 2,7 %, in limestones – 1,5 % (for details, see Tab. 1, 2).

Cross-plots of *OI-HI* and *Tmax-HI* (Rock–Eval parameters) indicate the existence of all types of kerogen (I-IV) in the studied samples. The degree of thermal maturity of kerogen corresponds to the region of "immature" rocks – 35 % of the samples, the region of the "oil window" of hydrocarbon generation – 63 % of the samples.

The maximum generating property is characteristic of terrigenous rocks – shales and mudstones with layers of sandstones from between-salt strata (D_3fm_1). There is a natural trend of increasing thermal maturity of rocks with increasing depth of deposits. At depths of more than 4,000 m, the degree of catagenetic maturity of rocks is highest in shales from between-salt deposits. Also, with increasing depth, the degree of realization of the generating potential of *TPI* kerogen increases. This dependence is influenced by the position of the sediments relative to saline strata: under-salt deposits of limestones and shales have elevated values of *TPI* relative to over-salt deposits. This is clearly manifested in the *Tmax* range of 430–440 °C – in the left part of the "oil window" of hydrocarbon generation.

Generalized conclusion based on the results of the above studies: most samples of shales and limestones have rather high concentrations of organic carbon; the thermal maturity of the rocks for 63 % of the samples corresponds to the "oil window"; all four types of kerogen are present in the rocks; the best oil-generating properties are characteristic of shales from between-salt strata; also, these mudstones have the maximum degree of realization of the generating potential of *TPI* – more than 0,3 at depths of 4,700 m. The results of the above studies indicate that the shales and limestones of the Frasnian and Famennian stages from the studied deposits can be considered as potential oil source rocks.

Authors' contributions: Ivan Karpenko – conceptualization, methodology, formal analysis, writing (original draft); Ihor Ishchenko – data validation, writing (review and editing); Oleksii Karpenko – formal analysis, writing (review and editing).

References

Eisenberg, D. E., Berchenko, O. I., & Brazhnikova, N. E. (1988). *Stratigraphy*. Vol. 2. Naukova dumka [in Russian]. [Айзенберг, Д. Е., Берченко, О. И., & Бражникова, Н. Е. (1988). *Стратиграфия*. Т. 2. Наукова думка].

Izart, A., Sachsenhofer, R., Privalov, V., Elie, M., Panova, E., Antsiferov, V., … & Zhykalyak, V. (2006). Stratigraphic distribution of macerals and biomarkers in the Donets Basin: Implications for paleoecology, paleoclimatology and eustacy. *International Journal of Coal Geology*, 66(1–2), 69–107. https://doi.org/ 10.1016/j.coal.2005.07.002

Karpenko, I. O. (2018). *Petroleum system of the Dnieper-Donets basin.* Part 1: Southern pre-board zone. Lambert Academic Publishing [in Ukrainian]. [Карпенко, І. О. (2018). *Нафтогазова система Дніпровсько-Донецької западини.* Ч. 1: Південна прибортова зона. Lambert Academic Publishing].

Karpenko, O., Bashkirov, G., & Karpenko, I. (2014). Determination of the content of organic matter in rocks based on geophysical data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(66), 71–76 [in Ukrainian]. [Карпенко, О., Башкиров, Г., & Карпенко, І. (2014). Визначення вмісту органічної речовини в гірських породах за геофізичними даними. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія,* 3(66), 71–76.

Karpenko, O. M., Krochak, M. D., & Baisarovych, I. M. (2017). *Actual problems of petroleum geology*. VPC "Kyiv University" [in Ukrainian]. [Карпенко, О. М., Крочак, М. Д., & Байсарович, І. М. (2017). *Актуальні проблеми нафтогазової геології.* ВПЦ "Київський університет"].

Khomenko, V. A. (1986). *Devonian of the Dnieper-Donets Basin*. Naukova dumka [in Russian]. [Хоменко, В. А. (1986). *Девон Днепровско-Донецкой впадины*. Наукова думка].

Lukin, O. (2006). Devonian of the Dnieper-Donets avlakogen (tectonic-sedimentary complexes, formations, genetic types of deposits and lithogeodynamics). *Geological journal*, 2–3. 26–46 [in Ukrainian]. [Лукін, О. Ю. (2006). Девон Дніпровсько-Донецького авлакогену (тектоно-седиментаційні комплекси, формації, генетичні типи відкладів та літогеодинаміка). *Геологічний журнал,* 2–3, 26–46].

Menning, M., Alekseev, A. S., Chuvashov, B. I., Davydov, V. I., & Devuyst, X. (2006). Global time scale and regional stratigraphic reference scales of Central and West Europe, East Europe, Tethys, South China, and North America as used in the Devonian-Carboniferous-Permian Correlation Chart 2003 (DCP 2003). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Elsevier)*, *October 6*, Vol. 240, Is. 1–2, 318–372. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.03.058.

Misch, D., Sachsenhofer, R., Bechtel, A., Gratzer, R., Grob, D., & Makogon, V. (2015). Oil/gas-source rock correlations in the Dnieper-Donets Basin (Ukraine): New insights into the petroleum system. *Marine and Petroleum Geology*, 67, 720–742. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.002.

Mykhailov, V. A., Vakarchuk, S. G., Zeykan, O. Yu., Kasyanchuk, S. V., Kurovets, I. M, & Vyzhva, S. A. et al. (2014). *Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine*. Book 8: Theoretical substantiation of unconventional hydrocarbon resources of sedimentary basins of Ukraine. Nika Center [in Ukrainian]. [Михайлов, В .А., Вакарчук, С. Г., Зейкан, О. Ю., Касіянчук, С. В., Куровець, І. М., & Вижва, С.А. та ін. (2014). *Нетрадиційні*

джерела вуглеводнів України. Кн. 8. Теоретичне обґрунтування ресурсів нетрадиційних вуглеводнів осадових басейнів України. Ніка-центр].

Ratnayake, A. S., Kularathne, C. W., & Sampei, Y. (2018). Assessment of hydrocarbon generation potential and thermal maturity of the offshore Mannar Basin, Sri Lanka. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 8, 641–654. https://doi.org/10.1007/s13202-017-0408-1.

Sachsenhofer, R., Popov, S., Coric, S., Mayer, J., Misch, D., & Morton, M. (2018). Paratethyan petroleum source rocks: an overview. *Journal of Petroleum Geology*, 41 (3), 219–245. https://doi.org/10.1111/jpg.12702

Sachsenhofer, R., Privalov, V., Zhykalyak, M., Bueker, C., Panova, E., Rainera, T., Shymanovskyy, V., & Stephenson, R. (2002). The Donets Basin (Ukraine/Russia): coalification and thermal history. *International Journal of Coal Geology*, 49(1), 33–55. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(01)00063-5.

Sachsenhofer, R., Shymanovskyy, V., Bechtel, A., Gratzer, R., & Horsfield, B. (2010). Palaeozoic source rocks in the Dniepr–Donets basin, Ukraine. *Petroleum Geoscience*, 16(4), 377–399. https://doi.org/10.1144/1354-079309-032

Stryzhak, V. P., & Korzhnev, P. M. (2012). Peculiarities of the Devonian deposits structure and oil and gas capacity of the northwestern part of Dnieper-Donets avlakogen. *Tectonics and Stratigraphy*, 39, 43–56 [in Ukrainian]. [Стрижак, В. П., & Коржнев, П. М. (2012). Особливості будови та нафтогазоносності девонських відкладів північно-західної частини Дніпровсько-Донецького авлакогену. *Тектоніка і стратиграфія*, 39, 43–56].

Tissot, B. P., & Welte, D. H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8

Waliczek, M., Machowski, G., Poprawa, P., Świerczewska, A., & Więcław, D. (2021). A novel VRo, Tmax, and S indices conversion formulae on data from the fold-and-thrust belt of the Western Outer Carpathians (Poland). *International Journal of Coal Geology*, 234, 1 February, 103672. https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103672

Отримано редакцією журналу / Received: 08.08.24
Прорецензовано / Revised: 30.09.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Іван КАРПЕНКО, канд. геол. наук
ORCID ID: 0000-0001-7753-9010
e-mail: karpenko.i.geoscience@gmail.com
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна
НАК "Нафтогаз України", Київ, Україна

Ігор ІЩЕНКО, д-р геол. наук
e-mail: Il_Ischenko@gmail.com
НАК "Нафтогаз України", Київ, Україна

Олексій КАРПЕНКО, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-5780-0418
e-mail: okarpenko.geol@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ГЕОХІМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ТЕРМАЛЬНА ЗРІЛІСТЬ ПОРІД ВЕРХНЬОГО ДЕВОНУ (ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКА ЗАПАДИНА) ЗА ДАНИМИ ПІРОЛІЗУ ROCK-EVAL (ПОШУКОВЕ БУРІННЯ)

Вступ. ***У Дніпровсько-Донецькій западині девонські відклади є дуже цікавим об'єктом дослідження вуглеводневої системи – від початкового етапу генерації вуглеводнів до етапу формування покладів нафти і газу. Наявність осадових товщ, збагачених розсіяною органічною речовиною, визначає нафтогазогенераційний потенціал відкладів. У статті розглянуто результати лабораторних досліджень порід верхнього девону, виконаних на піролітичній установці Rock-Eval з метою оцінки їх термальної зрілості та ступеня вуглеводневої генерації.***

Методи. ***Лабораторні дослідження виконано методом піролізу зразків гірських порід (Rock-Eval) з визначенням низки параметрів, які дають змогу оцінювати термальну зрілість, тип органічної речовини (керогену) і коефіцієнта перетворення органічної речовини. Обробку даних виконано із застосуванням методів математичної статистики.***

Результати. ***Важливим результатом досліджень є встановлено закономірність, що аргіліти з підвищеним вмістом органічного карбону (TOC) фаменського ярусу з міжсольових товщ у цій частині ДДЗ вже перебувають в активній фазі нафтогенерації і належать до нафтоматеринських пород. Як раз у цій частині Дніпровсько-Донецької западини зосереджені основні розвідані запаси рідких вуглеводнів Східного регіону.***

Висновки. ***За результатами досліджень було встановлено: більшість зразків аргілітів і вапняків мають доволі високі концентрації органічного вуглецю; термальна зрілість порід для 63 % зразків відповідає "нафтовому вікну"; у породах присутні всі чотири типи керогену; найкращі нафтогенерувальні властивості притаманні аргілітам з міжсольових товщ, також ці аргіліти мають максимальний ступінь реалізації генераційного потенціалу TPI – більше 0,3 на глибинах від 4700 м. Результати наведених досліджень свідчать, що аргіліти і вапняки франського і фаменського ярусів з вивчених відкладів можуть розглядатись як потенційні нафтоматеринські породи.***

Ключові слова: ***девон, кероген, піроліз, материнська порода, вуглеводні, Дніпровсько-Донецька западина.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

UDC 553.98(262.81)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.04

Elena POGORELOVA, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-2412-4441
e-mail: yy_pgrlova@mail.ru
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan Republic

Murad ABDULLA-ZADA, PhD (Earth Sciences)
ORCID ID: 0009-0001-4150-8340
e-mail: murad.abdullazade@asoiu.edu.az
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan Republic

OIL AND GAS BEARING COMPLEXES AND LITHO-STRATIGRAPHIC CHARACTERISTICS OF PLIOCENE DEPOSITS OF THE BULLA-DENIZ FIELD

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

Background. *In the current and long-term plans for the development of the country's fuel and energy balance, there is a significant emphasis on increasing and objectively assessing hydrocarbon resources to ensure a steady rise in oil and gas production. A decrease in geological exploration in the South Caspian basin has been observed, partly due to overestimates of predicted resources made before the twentieth century, which may have overly optimistic characterizations of the oil and gas potential of various regions and areas. In the Baku Archipelago, industrial deposits have been discovered in several geological horizons, with stratal deposits mainly associated with crestal tectonically shielded areas. A characteristic feature of the Productive Series (PS) section is the regular replacement of oil accumulations with gas and gas condensate in the direction of regional layer immersion.*

Methods. *The purpose of the study is to clarify and evaluate the prospects of oil and gas-bearing deposits within PS sediments. This involved analyzing a complex of geological and geophysical materials to determine the reservoir properties of these sediments. The study incorporated stock materials, published articles, and factual data. An inter-well correlation was performed based on well data to assess the reservoir properties of PS sediments. The geological structure, lithological confinement, and petrophysical features of the deposits were also examined.*

Results. *The analysis of the V horizon of the Bulla-Deniz field revealed that the section is predominantly clay (91 %) rather than sandy (9 %). The porosity of the section varies from 2 to 16 %, while the gas saturation parameter ranges between 0.47 and 0.61. The VII horizon, in contrast, has a relatively less clayey composition, which positively influences the reservoir parameters.*

Conclusions. *The study highlights the need for a more nuanced evaluation of hydrocarbon resources in the South Caspian basin, specifically within the Baku Archipelago. The results indicate that the Productive Series (PS) sediments, particularly in the V horizon of the Bulla-Deniz field, present significant challenges due to their high clay content and variable porosity and gas saturation. However, the VII horizon's relatively better reservoir properties suggest that targeted exploration and development efforts could yield promising results. To optimize future resource assessment and exploitation, it is essential to integrate updated geological and geophysical data with modern exploration techniques. This approach will ensure a more accurate understanding of the region's hydrocarbon potential and contribute to the sustainable management of its oil and gas resources.*

Keywords: *South Caspian basin, Baku archipelago, Bulla deniz, field, pliocene, Productive Serie, sediment.*

Background

One of the priorities for the development of the country's fuel and energy complex is a wide turnaround in geological prospects for oil and gas within the offshore zones of the seas and oceans, and the assessment of hydrocarbon resources using modern geological, geophysical and mathematical methods.

Oil and gas-bearing complexes confined to the depressions of Alpine tectogenesis are distinctive of epicontinental basins separated from the oceans by island arcs, and the coastal part of the oceans. These include the American Pacific coast and the aquatorial part of the Japanese Islands.

Oil and gas deposits are found throughout the entire area of the depression, but it is more likely that they will be found near its near edge parts. The same patterns are inherent in heterogeneous (intermountain) depressions of the Alpine cycle, which include the southern basin of the Caspian Sea, where the largest deposits are found near the northern, eastern and western sides; there is a high probability of rich oil and gas accumulations at the central part of the depression.

Nowadays, the whole Caspian Sea is one of the regions that play a key role in energy security in the world, whereby neighboring countries and foreign corporations actively participate in the extraction of its hydrocarbon resources.

The Baku Archipelago, being an integral part of the South Caspian Basin (SCB), is distinguished by a wide variety of geological conditions and prospects for the oil and gas potential of its various parts (Pogorelova, 2019, Mikhailov, 2017). Hence, increasing the efficiency of geological exploration in the oil and gas bearing area of the Baku Archipelago requires their clear orientation to the most deeply submerged horizons, where a growth in industrial reserves of oil, condensate and gas can be obtained with minimal time and material expenses.

Deep exploration drilling was carried out in a number of areas within the Baku Archipelago, among which the Bulla-Deniz field attracts special attention (Fig. 1).

In the Baku Archipelago, industrial deposits were discovered in the VIII horizon of the Balakhkhany suite, the Fasila suite, and the Postkirmaky sandy suite. Deposits of the stratal type are associated mainly with crestal tectonically shielded deposits. A characteristic feature of the oil and gas content of the Productive Series section is the regular replacement of oil deposits with gas and gas condensate deposits in the direction of the regional immersion of layers.

The Sangachal-Deniz – Duvanny-Deniz – Khara-Zira-Bulla-Deniz anticline belt is located within the northern part of the Baku Archipelago oil and gas region. A characteristic feature of the tectonic structure of the anticline belt is the presence of large longitudinal faults in the axial parts of the structures. Foci of mud volcanic activity are often associated with longitudinal faults. Numerous transverse faults divide the structures into separate tectonic blocks (Alizade et al., 2018).

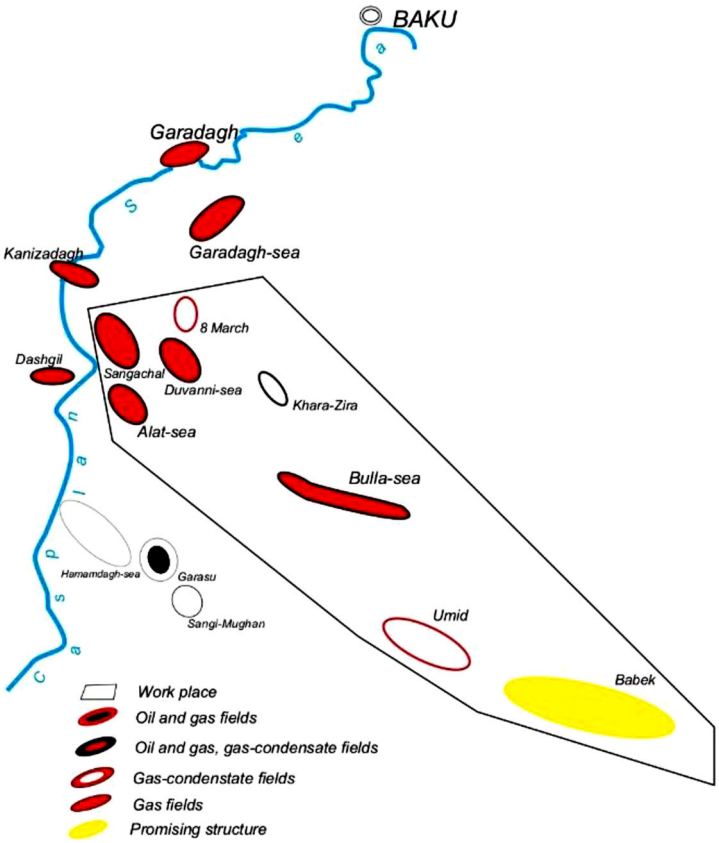


Fig. 1. Overview scheme of oil, gas and gas condensate deposits of Baku Archipelago

Methods

The study utilized a comprehensive dataset that included geological and geophysical data obtained from SOCAR seismic profiles, exploration wells, and stock materials. Key sources of data included:

1. Seismic data provided detailed structural and stratigraphic information about the Bulla-Deniz field.
2. Data from exploration wells were crucial for understanding the lithological and petrophysical properties of the Pliocene deposits. Well logs, core samples, and drilling reports were analyzed.
3. Relevant scientific publications provided additional context and supporting information for the analysis.

The litho-stratigraphic characteristics of the Pliocene deposits were examined by analyzing core samples and well logs. The stratigraphy was correlated across different wells to construct a comprehensive geological profile of the area.

The reservoir properties, such as porosity and permeability, were determined through laboratory analysis of core samples (made in AZLAB laboratory). These properties were mapped to identify areas with the highest potential for hydrocarbon accumulation (Menshov, 2021).

An inter-well correlation was performed to understand the spatial distribution of reservoir properties across the field. This involved aligning the stratigraphic sections of different wells to identify continuous reservoir layers.

Statistical methods were used to analyze the variability in porosity, permeability, and hydrocarbon saturation across different horizons. Based on the compiled geological and petrophysical data, reservoir maps were created to simulate the distribution of hydrocarbons. These constructions helped in forecasting the planning future exploration activities.

Structural-tectonic setting and Stratigraphy. The Bulla-Deniz field is located in the northern part of the Baku archipelago and is included in the Kanizdag-Bulla-Deniz anticlinal belt. The formation of the Baku Archipelago fold began in the early Pliocene and ended a little later than the Absheron peninsula.

Bulla-Deniz uplift is a closed fold (Fig. 2). According to the VII horizon of the Karadag division of the Productive Series of the Bulla-Deniz field consists of a large brachyanticline fold symmetrical in the transverse section and asymmetrical in the longitudinal section.

The length of the structure is 27 km, the width is 9 km, the height of the fold in the northeast limb is 1400 m. A characteristic feature of the region tectonics is the presence of large longitudinal faults in the structures of anticlinal belts along the axis, and many of them are traced up the entire length of the anticlinal fold. There has been indicated the activity of mud volcanoes (gas manifestation, gryphon and etc.) within longitudinal faults (Fig. 3).

According to seismic works, exploration wells in the northwestern periclinal and the northeastern limb, the Bulla-Deniz uplift connects with the southwestern limb of the Khara-Zira uplift, and the southwestern limb of the structure crosses a wide synclinoria and consociates with the northeastern limb of the Umid structure.

According to the deep drilling and seismic exploration data the top VII horizon, of the Bulla-Deniz structure evolved as a brachyanticlinal fold with the dimensions of 27 x 9 km, extending towards the northwest and southeast, the height of the fold is 1400 m (Fig. 4b.). The fold is asymmetric: the lying angle of the layers is 22° in the northeastern limb, 15° in the crestal part, 22–11° in the southwestern limb, and 11–12° in the periclinal part.

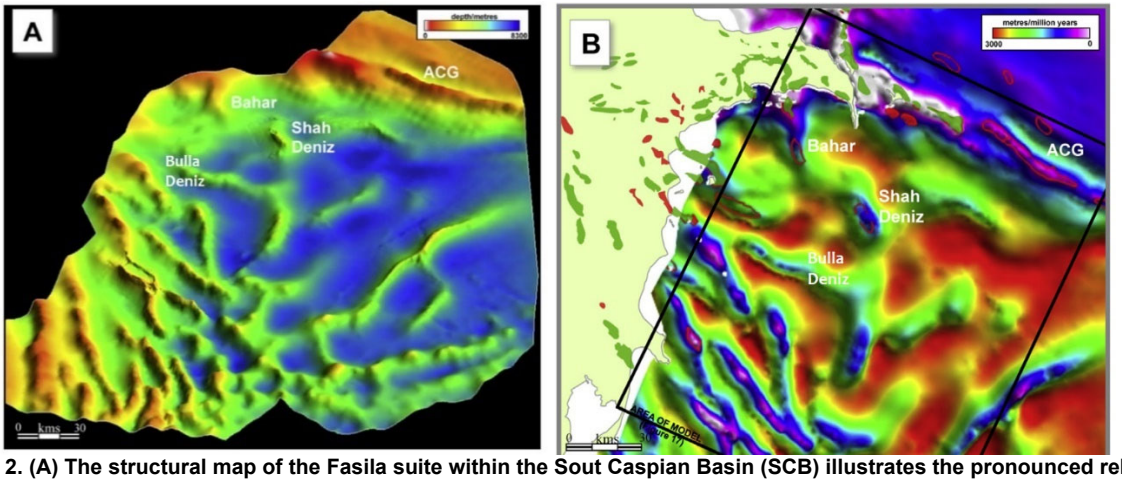


Fig. 2. (A) The structural map of the Fasila suite within the Sout Caspian Basin (SCB) illustrates the pronounced relief of SCB anticlines, with the elevation change from syncline to the crest of the structure exceeding 3 kilometers. (B) The sedimentation rate from the Pleistocene epoch to the present is depicted in meters per million years within the SCB, highlighting significant disparities in sedimentation rates between synclines and the crests of structures (According to Javanshir et al., 2015)

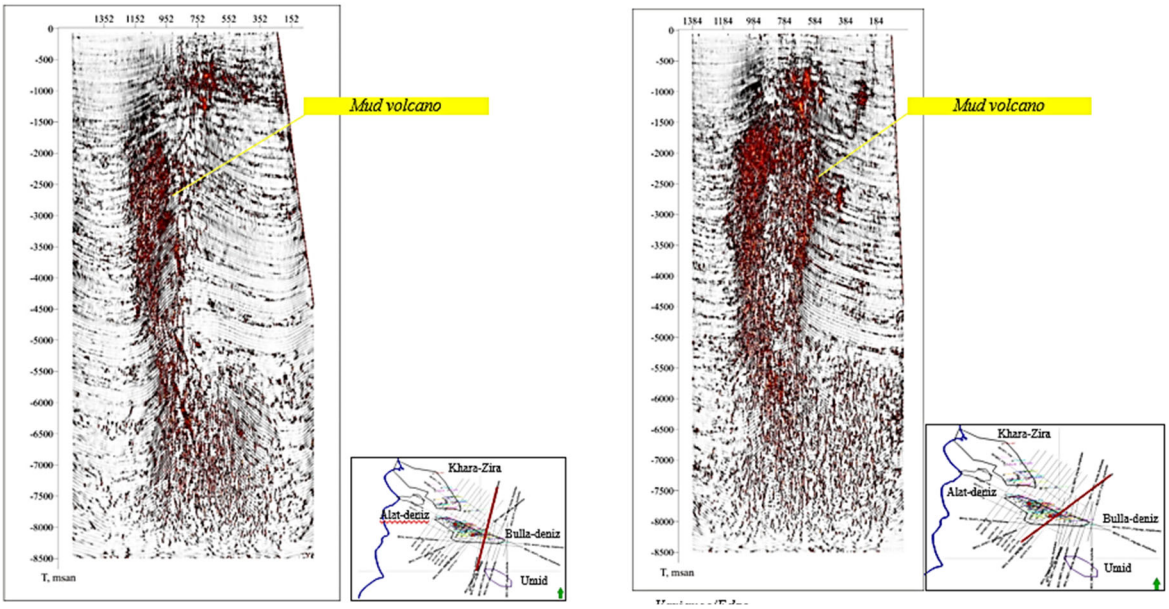


Fig. 3. Sublongitudal seismic sections. Activity of mud volcanoes within longitudinal faults (SOCAR)

The crestal part of the structure and its southwestern limb are characterized by two longitudinal faults in the northwest direction with an amplitude of 900–1000 m, and they divide the structure into separate tectonic zones: the northwestern, central area, and southwestern limb. The V horizon in the central area and southwest limb has not been intersected with deep wells. In the north-eastern limb of the structure, six transverse fractures (NN 3,4) were marked, which divided it into six blocks (Fig. 4a.). The amplitude of some of them (NN 3,4,6) reaches 250 m, while the amplitude of other faults is less than the thickness of the horizon (40–60 m) (Kerimov et al., 2015; Glumov et al., 2004).

means of several wells (wells 53, 56, 70, 71, 74, 72, 77), these well data are not enough to establish an accurate structural map of the VIII horizon. Therefore, the law of normal sedimentation was used.

In the geological section of the Bulla-Deniz field Quarternary, Upper Pliocene and PS sediments were encountered. The existence of Miocene sediments confirmed by deep drilling in the adjacent fields is also beyond doubt. Lithologic and facial characteristics of the section are based on results of core analysis and well log interpretation.

The Productive Series formed due to various sources of sedimentary supply, the main routes of which were the paleorivers of the Volga, Kura, and Araks, in the northwestern part of the South Caspian Basin is represented by the Absheron, Gobustan, and Lowerkura facies (Khalilova, & Seyidov, 2023; Kerimova, 2023).

The Absheron facies is a rhythmic alternation of sands, siltstones and clays, the thickness of which varies widely – from several meters to several hundreds and thousands of meters. The Gobustan type of sediments is marked by poor sorting and weak differentiation. Alternation of pure sandy and clay packages is not observed, mixed types of rocks prevail – clay-sand, sand-siltstone and others, which are characterized by the predominance of one or another fraction. The Lowerkura type of sediments is represented by an alternation of siltstone-clay-sand rocks and is characterized by significant clay formation compared to the Absheron type, a small content of quartz and an increase in the amount of feldspar, pyroxene, hornblendite, which indicates the dominance of igneous rocks in the area of erosion (Abdulla-zada, & Vakhably, 2021; Alieva, 2004).

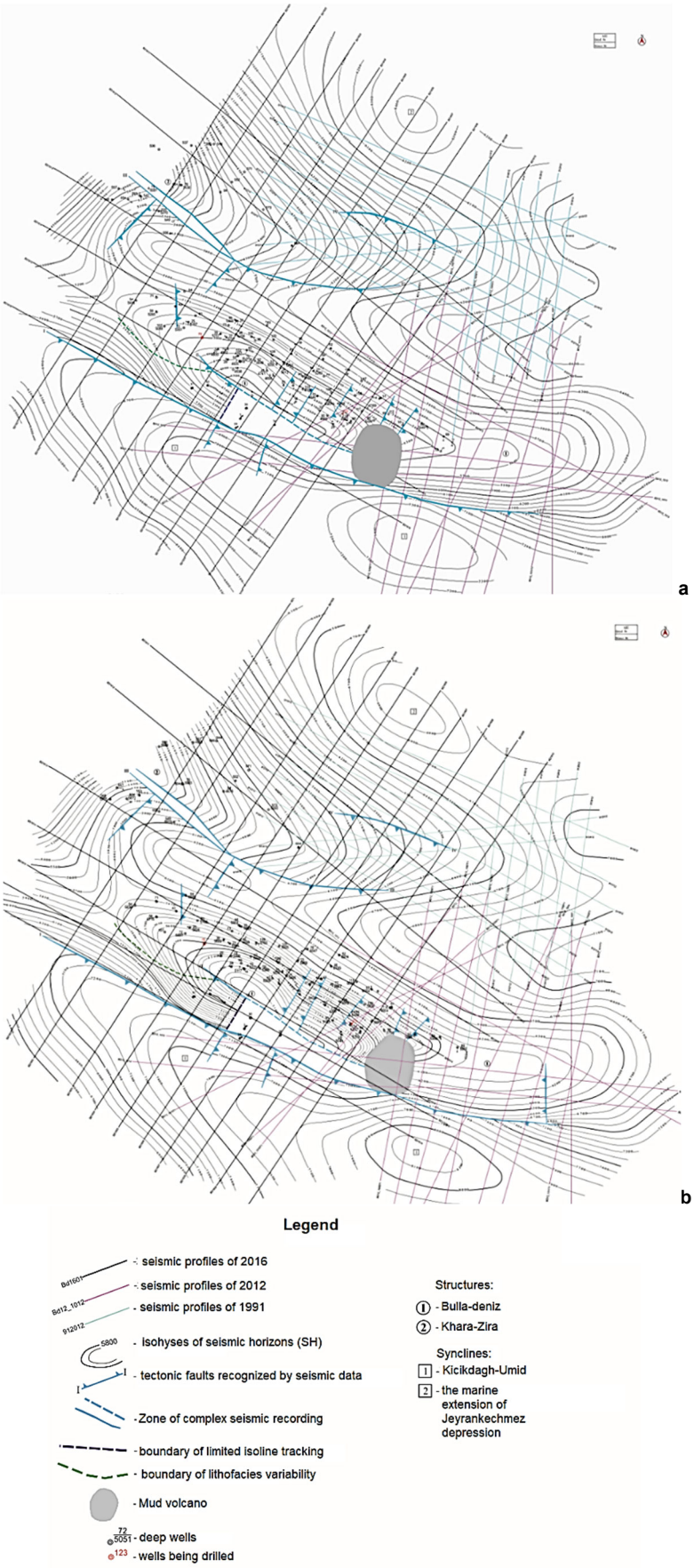


Fig. 4. Structural maps of (a) V horizon and (b) VII horizon (Compiled by SOCAR)

The VIII horizon in Bulla-Deniz field was encountered by Lithologically, the section of sediments of the Productive Series within the South Absheron anticline belt and the Baku Archipelago is represented by alternating layers of clays and sands (Fig. 5.). Reservoirs within the South-Absheron anticline belt are stacked in mainly sands and sandstones, and in the Baku Archipelago, the predominant rocks in the composition of reservoirs are siltstone differences (Aliyeva, 2021). In general, the section of the Productive Series in the Baku Archipelago is more clayey compared to the South Absheron anticlinal belt. In the direction of the Baku archipelago, the sandy material decreases in its section and the mixing of three facies occurs with the gradual disappearance of the Absheron facies to the south (Yusubov, Guliev, & Guseinova, 2020; Yusubov, & Guliev, 2015).

Quaternary sediments consist of a complex of ancient Caspian and modern marine sediments and are up to 650 m thick. The section of the Absheron suite is dominated by clays, and there are intersections of sand and clayey sand sediments. The total thickness is 800 m. Aghchagil suite consists mainly of clay layers, where the thickness is 70 m.

Productive Series section is represented here by two types of sediments, Lowerkura and Absheron facies.

The section of PS was encountered till the upper parts of Kirmaki suite. The deepest well No. 62 in the field reaches the depth of 6400 m (to the VII top horizon). So, well No. 74 reached the Kirmaki suite (KS) at a depth of 5792 m and dissected the top of KS only up to 100 m. The bottom horizons of the Productive Series (Prekirmaki suite, Gala suite) were not reached by exploratory wells in the Bulla-Deniz field.

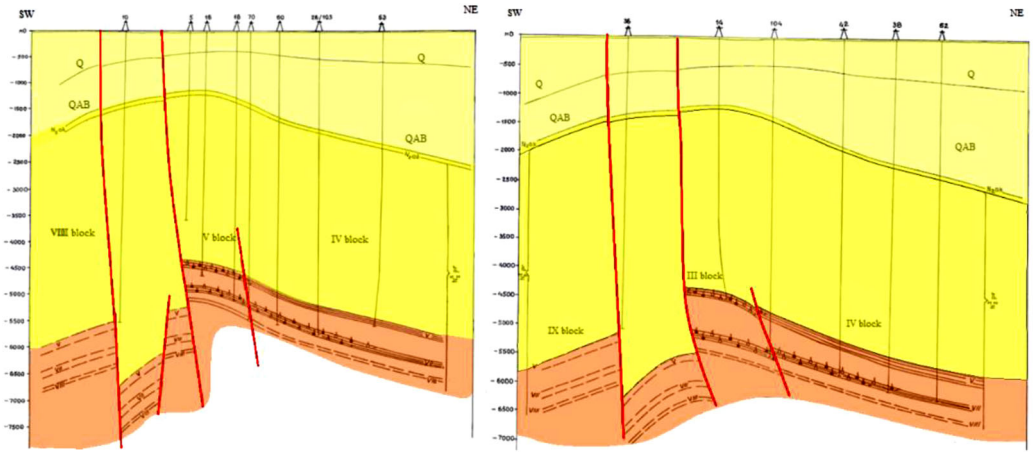


Fig. 5. Geological profiles through the Bulla-deniz field (authors' constructions based on SOCAR seismic profiles)

The PostKirmaki shaly suite (unseparated thickness) of the Productive Series (PS) is up to 3300 m and differs in the absence of oil and gas deposits. In the lower part of the PS (from the top of the V horizon – analogue to the VIII and IX horizons of the Absheron section's Balakhany suite) Absheron facies are widespread and they are of interest in terms of oil and gas content.

Miocene sediments have not been studied by drilling yet. Taking into account the tectonic setting of the area, it can only be assumed that the sediments lying below the PS can begin with the Pontine age (thickness 150–200 m).

The confident division of the upper part of the Productive Series (Surakhany suite, Sabunchu suite, Balakhany suite and Fasila suite) on the Absheron division is uncertain. So, we divide the upper part of the PS into the following lithological units:

V horizon (analogue to the VIII and IX horizons of the Absheron section's Balakhany suite);

VII horizon (according to the Absheron division is analogue to the "Fasila" suite).

The sediments of V horizon are represented by sandy layers with a thickness of 130 m, which are calculated to be 45 %. The upper part of the V horizon (thickness 55 m) is composed of clays with an estimated resistivity of 3–5 Ohms, which is not attracting from the point of view of gas content.

In the section of the V horizon, two well-permeable objects (V_{top} and V_{bot}) were identified for calculating hydrocarbon reserves, both according to the peculiarities of electric logging and the results of well exploitation (Fig. 6). The average thickness of these objects is 21 and 31 m, respectively. Layers 3–7 m thick, sometimes 14 m prevailing, are marked inside each object with a calculated reserve, and their true resistivity reaches 8–10 Ohms. The permeable parts of the object, whose reserves are calculated, are separated by a 20 m thick clay layer.

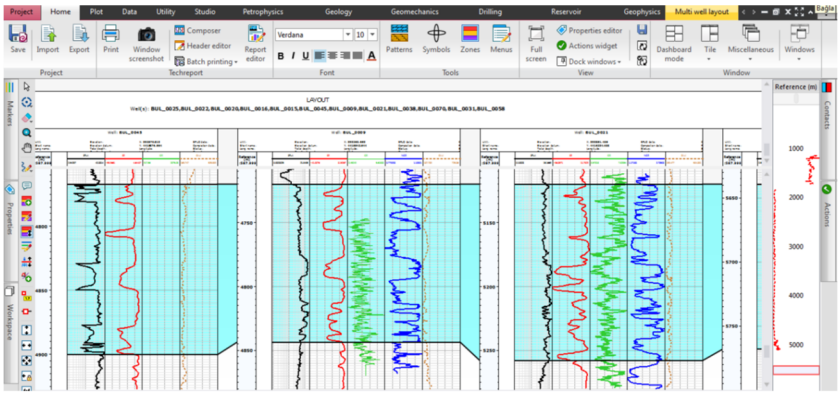


Fig. 6. Well correlation scheme of V horizon

Unit V–VII consists of homogeneous clay with an estimated resistivity of 2–4 Ohms, without differentiation along the SP line.

In the lower part of the section, thin sandstone interlayers are observed, which make up – 10 % of the entire section. The thickness of the V–VII unit varies sharply within the field and averages 370 meters. The lowest value of V-VII unit (up to 320 m) was observed in wells No. 20, 46, and the largest (557–575 m) in wells No. 104, 80, respectively.

The VII horizon (according to the Absheron division is analogue to the "Fasila" suite), has a thickness of 100 m and consists of sandstones and clay interlayers (Fig. 7). The cross-section of the horizon is sandy, where the thickness of sandstone layers constitutes 59 %. Correlation of the well sections allows selecting two objects for reserve calculation in this horizon (VIItop and VIIbot) separated by 25 m thick clay layer.

In the section of the VII horizon, sandy layers are characterized by a resistivity of 10–20 Ohms, in some cases the resistivity values reach even 40 Ohms. The thickness of the sandy layers is 3–6 m, and in some cases, it reaches 12 m. The average thickness of the calculated reserve objects is VIItop – 49 m and VIIbot – 25 m.

The lower part of the PS, we divide into the following lithological units:

VIII horizon (according to the Absheron division is analogue to the "Postkirmaki sandy" suite).

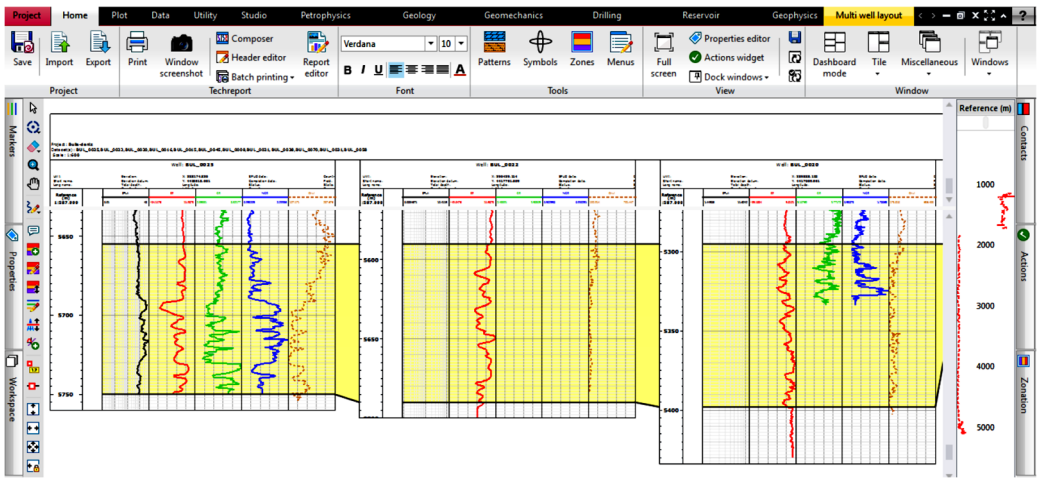


Fig. 7. Well correlation scheme of VII horizon

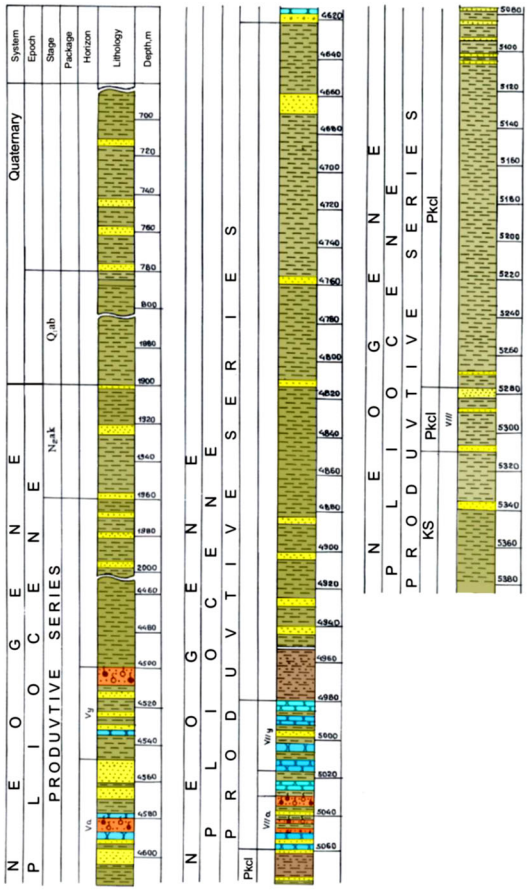


Fig. 8. Generalized geological cross-section

PostKirmaki clayey suite consists of a variety of clays with sand interlayers, sandstone, siltstone of small thickness. The thickness of the suite ranges from 120–250 m. Suite pinchout, unlike the lower horizons, is not observed. The electric log curves are poorly differentiated. Sandy sediments are characterized by high resistivity values.

As mentioned above, deeper horizons were not intersected in the Bulla-Deniz field (only Kirmaki suite was encountered up to 100 m). Therefore, the section is given analogously to the adjacent Sangachal-Deniz – Duvanni-Deniz – Khara-Zira fields.

Kirmaki suite was intersected in 6 wells in the Bulla-Deniz field. The maximum thickness (more than 100 m) was noted in the well No. 74, the depth of the well is 5792 m. In the Sangachal-Deniz – Duvanni-Deniz – Khara-Zira fields, located in the neighboring area, the average thickness of the sediments of Kirmaki suite is 350 m, and it consists of clays characterized by interlayers of sand and sandstone with very little thickness (Kerimov, Sharifov, & Zeynalova, 2023). To assume so, it is possible that this layer group will be presented as the same lithofacies in the Bulla-Deniz field.

PreKirmaki suite consists of sandy-clay lithofacies, with sand-siltstone predominance in the Sangachal-Deniz – Duvanni-Deniz field. It can be assumed that the 9 m thick PreKirmaki suite in the Bulla-Deniz field will be suitable for the accumulation of hydrocarbons (Javanshir et al., 2015).

In the Bulla-Deniz field, the Gala suite has a thickness of 400 m, and is characterized by clay facies and an increase in sand-siltstone material in its lower part (Fig. 8).

Sediments underlying the PS. It is assumed that there are no Pontine sediments in the southern lower part of the adjacent Sangachal-Deniz – Duvanni-Deniz – Khara-Zira fields, so the lower part of the PS in the wells is included in the diatom formation. Taking into account the geological structure of the studied region, it can be assumed that in the Bulla-Deniz field, Pontine sediments with a thickness of not less than 150 m lie in the lower part of the PS.

Results

The results of the analysis of rock samples from wells drilled at the Bulla-Deniz field were obtained, analyzed and investigated in order to monitor the area and section of perspective horizons.

The rock samples taken from wells drilled in the Bulla-Deniz field consist mainly of clays, siltstones and sandstones.

Reservoir properties of rocks taken from the Bulla-Deniz field by means of wells were mainly studied on 97 rock samples. They are represented by clays, clayey siltstones and thin sand interlayers. Clays are gray, brown-gray in color and mostly poorly sorted.

Clay rocks consist of the following fractions: the sandstone fraction varies from 1.1 to 9 % and makes up an average of 2.3 %, the siltstone fraction makes up from 14 to 23 % and makes up an average of 18 %, the clay fraction makes up from 71 to 86 % and makes up an average of 77.3 %.

Siltstone rocks are characterized by the following fraction composition: the sand fraction varies from 8.2 to 14.4 % and constitutes an average of 11.2 %, siltstone fraction varies from 54.8 to 66.0 % and constitutes an average of 59 %, the clay fraction varies from 18 to 34.5 % and constitutes an average of 22.5 %.

Sandstones are characterized by the following fractional composition: the sand fraction varies from 20.2–26.5 % and constitutes an average of 21.5 %, the clay fraction varies from 31.8 to 43.7 % and constitutes an average of 34.2 %.

The porosity of the studied rocks of the upper part of the PS varies in the following interval:

- clays 11.3–21.0 % (average 14.0 %);
- siltstones 14.1–25.5 % (average 17.3 %);
- sandstones 17.1–22.0 % (average 19.3 %).

The permeability of the studied rocks of the upper part of the PS varies in the following interval:

- clays 3.5–13.4% (average 8.1 %);
- siltstones 5.6–13.6 % (average 10.7 %);
- sandstones 8–10.4 % (average 9.1 %).

In the Bulla-Deniz field, silty layer sediments were opened by means of exploration wells. The sediments of this part of the section consist of silt, clay and clay-silt sand interlayers.

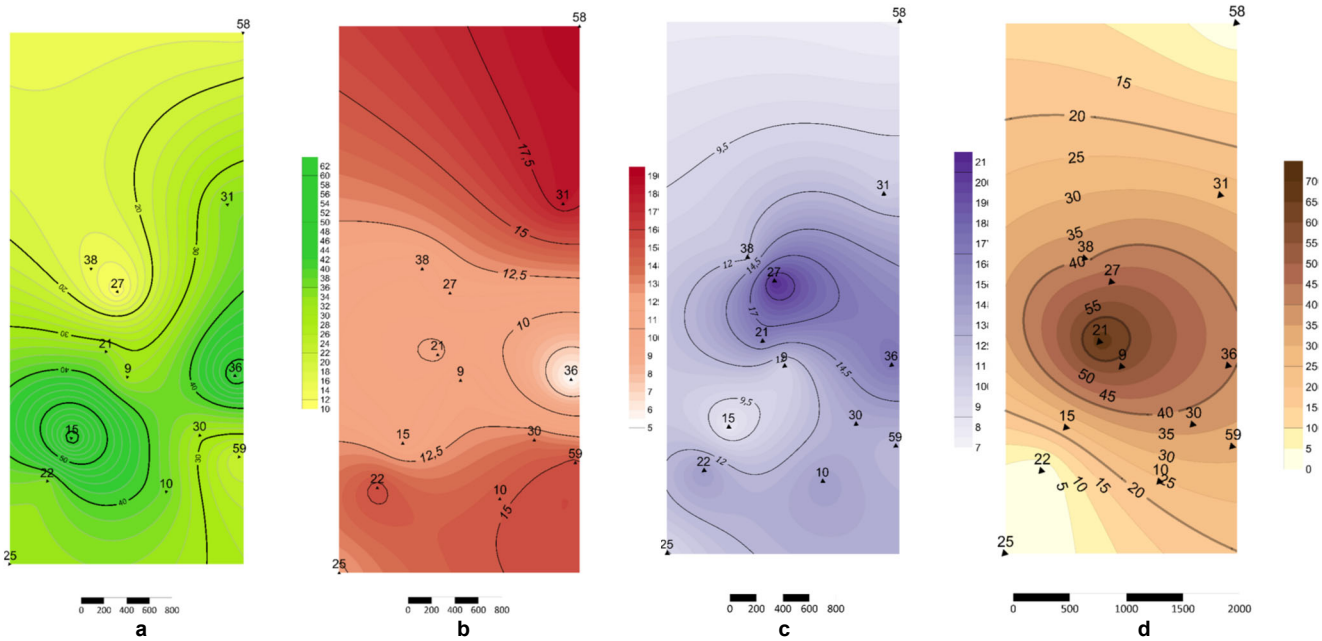


Fig. 9. (a) Vsh, (b) Cc, (c) Porosity and (d) Permeability maps of the V horizon

The porosity of rocks in the lower part of the PS is 6.4–10.6 % for clays (average 9 %), for siltstones 5.4–20 % (average 18.8 %), for sandstones 20.4–28 % (average 22.7 %).

The permeability of these rocks varies from 0.8 to 9.3 mD for clays (average 1.6 mD), for siltstones it varies from 4.8 to 9.5 mD (average 7.4 mD), for sandstones from 18.4 to 28 mD variable (average 21.6 mD).

Clay rocks are practically impermeable.

The comparison of the lithological and reservoir properties of the upper and lower parts of the PS sediments is observed with the improvement of their reservoir properties, permeability and porosity as the depth increases.

Industrial oil and gas potential of the Bulla-Deniz field was determined in 1973 by means of wells of VII horizon (No. 18), in 1974 – V horizon (No. 14) and in 1982 – VIII horizon (No. 56).

The daily productivity of wells pumping powerful gas from great depths from the VII horizon of the Bulla-Deniz field was much higher than the daily productivity of wells operated from the VII horizon of the Khara-Zira uplift and Sangachal-Deniz field (Abbasov, & Guyiev, 2003).

In 1982, the exploitation of Well No. 56 in Bulla-Deniz field showed the accumulation of oil and gas reserves of industrial importance in this horizon.

In 2012–2013, there was a fire in the well as a result of the exploitation Well No. 90 with high pressure gas during drilling. The fire in the well was extinguished after a period of 2 months. This well, starting from 23.10.2013 continued to work with 1.3 mln m^3/g of gas and 200 t/g of condensate. After the comparison of the logging diagrams, it was confirmed that with the fountain the gas-bearing object corresponds to the VIII horizon of PS sediments (Bagirov, Minzverg, & Kondrushkin, 1975). As a result, the high productivity of the VIII horizon was once again confirmed. In terms of oil and gas prospects, the VIII horizon of the PS has a high potential. Drilling deep wells in this horizon is economically viable, although technically difficult.

In the Bulla-Deniz field, according to the reservoir properties of the V horizon of PS, the sand content is about 9 %, and the clay content is 91 %. The values characterizing the calculated porosity coefficient are approximately 2–16 %, and the oil viscosity parameter values range from 0.47 to 0.61 (Fig. 9). These parameters range from 16 %, 84 % for VII horizon, 0.9–14 % for porosity and 0.54–0.64 % for oil saturation. From the obtained data it can be seen that according to V horizon relatively high values of porosity are observed in the central part of the research area, and a slight increase in this parameter is observed in the southern part. The value of oil saturation in these areas is also changing. Within the VII horizon the values of porosity and oil viscosity ratios are spread chaotically across the area.

Discussion and conclusions

Proved oil and gas content in the sediments of the Productive Series within the Baku Archipelago has a fairly wide distribution both in the central and northern areas, and in the stratigraphic interval of the section.

Based on the consistently performed work on the anticline zone, the tectonic setting of the deposit, its lithological and stratigraphic affiliation and oil and gas potential were clarified.

It was concluded that, based on the compiled maps of the V horizon of the Bulla-Deniz area, it turned out that the section is composed predominantly of clay facies (91 %), rather than sandy (9 %) sediments. Values of porosity here changes in span from 2 to 16 %, where the gas saturation parameter varies between 0.47–0.61.

The VII horizon is characterized by a relatively less clayey section, which mainly has a positive effect on the remaining parameters.

Authors' contribution: Elena Pogorelova – writing, investigation, methodology, formal analysis, conceptualization, data curation, supervision; Murad Abdulla-zada – investigation, writing, visualization, data curation, formal analysis, supervision.

References

Abbasov, Z. Y., & Guliyev, A. M. (2003). *Recalculation of hydrocarbon reserves in the Bulla-sea gas condensate oil field.* Elm, pp. 3–8 [in Russian]. [Аббасов, З. Ю., & Гулиев, А. М. (2003). *Пересчет запасов углеводородов на газоконденсатном нефтяном месторождении Булла-море*. Элм, с. 3–8].

Abdulla-zade, M. Ch., & Vakhably, N. F. (2021). About the petrofacial analysis of sediments of the Productive serie`s lower section of Absheron-Balkhan uplift zone based on geophysical and core studies. *Geologist of Azerbaijan*, 112–117.

Alizade, A. A., Guliyev, I. S., Mamedov, P. Z., Alieva, E. G., Feyzullaev, A. A., & Huseynov, D. A. (2018). *Productive serie of Azerbaijan.* V. 1. Nedra [in Russian]. [Ализаде, А. А., Гулиев, И. С., Мамедов, П. З., Алиева, Э. Г., Фейзуллаев, А. А., & Гусейнов, Д. А. (2018). *Продуктивная серия Азербайджана.* Т. 1. Недра].

Aliyeva, E. G. (2004). *Depositional environment and reservoir architecture of the Productive Series VII–V horizons in the Alyat ridge offshore part (Alyat-deniz, Bulla-deniz fields).* Baku, pp. 41–49.

Aliyeva, S. A. (2021). Methods of predicting lithological-facial characterization of deeply buried prospective oil and gas bearing sediments. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(92), 88–92.

Bagirov, B. A., Minzverg, L. V., & Kondrushkin, Y. T. (1975). *Generalization of the results of prospecting and exploration studies for the purpose of calculating gas and condensate reserves along the VIII horizon of the Duvanny-Sea and Bulla-sea*. Baku, pp. 36–44.

Glumov, I. F., Malovitsky, Ya. P., Novikov, A. A., & Senin, B. V. (2004). *Regional geology and oil and gas potential of the Caspian Sea. Nedra-Business Center* [In Russian]. [Глумов, И. Ф., Маловицкий, Я. П., Новиков, А. А., & Сенин, Б. В. (2004). *Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря.* Недра-Бизнес-Центр].

Javanshir, R. J, Riley, G. W, Duppenbecker, S. J, Abdullayev, N. R. (2015) Validation of lateral fluid flow in an overpressured sand-shale sequence during development of Azeri-Chirag-Gunashli oil field and Shah-Deniz gas field: South Caspian Basin, Azerbaijan. *Mar. Pet. Geol.*, 59, 593–610. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.07.019

Kerimov, V. M., Sharifov, J. J., & Zeynalova, S. A. (2023). Intensification of oil production in long-term developed offshore fields. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 31(2), 59–66.

Kerimov, V. Yu., Guliyev, I. S., Guseinov, D. A., Lavrenova, E. A., Mustayev, R. N., Osipov, R. N., & Serikova, U. S. (2015) *Forecasting of Oil and Gas Potential in Regions with Complex Geological Structure*. Nedra [in Russian]. [Керимов, В. Ю., Гулиев, И. С., Гусейнов, Д. А., Лавренова, Е. А., Мустаев, Р. Н., Осипов, Р. Н., & Серикова, У. С. (2015) *Прогнозирование нефтегазоносности регионов со сложным геологическим строением.* Недра].

Kerimova, K. A. (2023). Study of petrophysical parameters of productıve serıes by use of well data. *Geophysical Journal,* 45(3), 135–142.

Khalilova, L. N., & Seyidov V. M. (2023). Evolution of hydrocarbon deposits in the South Caspian Basin. *Geophysical Journal,* 45(3), 126–134.

Menshov, O. I. (2021). The role of magnetic methods in the exploration of the territories of impacted rocks-reservoirs of oil and gas: setting the task. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(92), 42–49 [in Ukrainian]. [Меньшов, О. І. (2021). Роль магнітних методів при дослідженні територій ущільнених порід-колекторів нафти і газу: постановка задачі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія,* 1(92), 42–49].

Mikhailov, V. (2017). Comparative characteristics of the Maikop series of the Caspian-Black Sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77(2), 59–71 [in Russian]. [Михайлов, В. (2017). Сравнительная характеристика майкопской серии Каспийско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія,* 77(2), 59–71].

Pogorelova, Ye. Yu. (2019) Geotectonic aspects of oil and gas potential of the intermountain segment of the Black Sea-Caspian Sea region. *Naukovyi Visnyk NHU*, 1, 5–12.

Yusubov, N. P., & Guliev, I. S. (2015). The lithological-facies models of the Garadag, March 8, Sangachaly-deniz, Duvani-deniz, Bulla-adasy and Bulla-deniz fields, dated to the "interval break" according to GIS data. A*zerbaijan oil industry*, 5, 3–8.

Yusubov, N. P., Guliev, I. S., & Guseinova, S. M. (2020). Paleo-environments of sedimentation, mud volcanism and hydrocarbons migration in the South-Caspian basin. *Geophysical Journal,* 42(3), 195–205.

Отримано редакцією журналу / Received: 28.05.24
Прорецензовано / Revised: 19.09.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Єлена ПОГОРЄЛОВА, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-2412-4441
e-mail: yy_pgrlova@mail.ru
Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджанська Республіка

Мурад АБДУЛЛА-ЗАДЕ, д-р філософії (науки про Землю)
ORCID ID: 0009-0001-4150-8340
e-mail: murad.abdullazade@asoiu.edu.az
Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджанська Республіка

НАФТОГАЗОНОСНІ КОМПЛЕКСИ ТА ЛІТОЛОГО-СТРАТИГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛІОЦЕНОВИХ ВІДКЛАДІВ РОДОВИЩА БУЛЛА-ДЕНІЗ

Вступ. ***У сучасних та довгострокових планах розвитку паливно-енергетичного балансу країни важливим є підвищення та об'єктивна оцінка ресурсів вуглеводнів з метою забезпечення постійного зростання об'ємів видобутку нафти та газу. Спостерігається зменшення обсягу геологорозвідувальних робіт у Південнокаспійському басейні, частково через те, що оцінки прогнозованих ресурсів, зроблені до двадцятого століття, були завищені і, можливо, надмірно оптимістично характеризували нафтовий і газовий потенціал окремих нафтових і газових провінцій, регіонів та районів країни. На Бакінському архіпелазі виявлено промислові поклади в горизонтах VIII ярусу Балаканської свити, свити Фасіла і посткірмакінської піщаної свити. Поклади стратиграфічного типу переважно асоціюються з гребеневими тектонічно захищеними відкладами. Характерною рисою нафтового і газового змісту секції Продуктивного ярусу (ПЯ) є регулярна заміна нафтових покладів на газ і газовий конденсат у напрямку регіонального занурення шарів.***

Методи. ***Метою дослідження є уточнення та оцінка перспектив нафто- і газоносних покладів відкладень ПЯ. Для цього було проведено аналіз комплексу геологічних і геофізичних матеріалів з метою визначення властивостей резервуарів цих відкладів. Дослідження включало використання матеріалів фондів, опублікованих статей та фактичних даних. На основі даних зі свердловин було виконано міжсвердловинну кореляцію для оцінки властивостей резервуарів відкладів ПЯ. Також було вивчено геологічну структуру, літологічне обрамлення і петрофізичні характеристики покладів.***

Результати. ***Аналіз V горизонту Буль-Денізського родовища показав, що секція складається переважно з глини (91 %), а не піску (9 %). Пористість секції коливається від 2 до 16 %, тоді як параметр газонасиченості варіюється між 0,47 і 0,61. VII горизонт, навпаки, має відносно меншу глинистість, що позитивно впливає на резервуарні параметри.***

Висновки. ***Дослідження підкреслює необхідність більш детальної оцінки вуглеводневих ресурсів у Південнокаспійському басейні, зокрема в Бакінському архіпелазі. Результати показують, що осадові відклади Продуктивної серії, особливо у горизонті V родовища Булла-Деніз, становлять значні виклики через високий вміст глини та змінну пористість і газонасиченість. Проте кращі параметри резервуарів у горизонті VII свідчать про те, що цілеспрямовані зусилля в розвідці та розробці можуть принести перспективні результати. Для оптимізації майбутньої оцінки та експлуатації ресурсів важливо інтегрувати оновлені геологічні та геофізичні дані із сучасними методами розвідки. Такий підхід забезпечить більш точне розуміння вуглеводневого потенціалу регіону і сприятиме сталому управлінню його нафтогазовими ресурсами.***

Ключові слова: ***Південнокаспійська западина, Бакинський архіпелаг, Булла-Деніз, родовище, пліоцен, Продуктивний ярус.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

УДК 550.834.05:551.24
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.05

Андрій ТИЩЕНКО, канд. геол. наук, менеджер проєктів
ORCID ID: 0000-0001-9640-2300
e-mail: Tyshchenko@naftogaz.com
НАК "Нафтогаз України", Київ, Україна
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Олександр КИЧКА, головний фахівець
ORCID ID: 0000-0003-1545-8738
e-mail: oleksandr.kychka@ugv.com.ua
Український науково-дослідний інститут природних газів, Київ, Україна

Андрій ВИЖВА, канд. фіз.-мат. наук, головний фахівець
ORCID ID: 0009-0003-6699-5848
e-mail: andrii.vyzhva@ugv.com.ua
Український науково-дослідний інститут природних газів, Київ, Україна

ШЕЛЬФОВІ ПАЛЕОРУСЛА, СХИЛОВІ КАНЬЙОНИ, ГЛИБОКОВОДНІ КОНУСИ І ПІДВОДНІ КОМПЛЕКСИ МАСОПЕРЕНОСУ ТА ЇХ ВПЛИВ НА МІГРАЦІЮ ВУГЛЕВОДНІВ НА ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОМУ ШЕЛЬФІ ЧОРНОГО МОРЯ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Вступ. *Тектонічна еволюція і структурна будова шельфової зони зчленування Східноєвропейської платформи, Переддобруджинського передового прогину Скіфської плити та накладеної мезо-кайнозойської Чорноморської западини вирізняються особливою складністю. Представлені дослідження даної зони зчленування просторово відповідають мілководній внутрішній частині північно-західного шельфу Чорного моря.*

Методи. *Було проведено тематичну геологічну інтерпретацію регіональних сейсмічних даних 2D CDP, що включала 47 профілів (загальна довжина майже 10 000 км), отриманих для НАК "Нафтогаз України" у 2005 році та переоброблених із застосуванням методу відновлення істинної амплітуди. Ці структурні побудови доповнено інтерпретацією дещо щільніших 2D CDP сейсмічних даних, отриманих компанією Western Geophysical у 1994 році, хоча остання застосовувала інші параметри зйомки та методику обробки.*

Результати. *У межах українського сектору північно-західної частини Чорного моря і суміжної акваторії за результатами комплексних досліджень було вперше закартовано масштабну систему глибоководних підводних комплексів масопереносу неоген-четвертинного віку. На основі тематичної інтерпретації було з'ясовано, що система глибоководних підводних комплексів масопереносу у своїй підошовній частині площинного ковзання утворює систему багатоярусних екранів на шляху висхідної міграції вуглеводнів. Детальна геологічна інтерпретація даних сейсморозвідки, а також глибокого буріння дала змогу виділити дренажну мережу, яка поєднує в собі колекторські різновиди турбідитів і каналів дистальних конусів виносу, а також комплексу заповнення врізаних долин континентального палеосхилу та похованих річкових палеодолин внутрішнього шельфу.*

Висновки. *Система високоамплітудних крайових скидів краю палеошельфу та ерозійних поверхонь контролює шляхи перетікання вуглеводнів з нижчих структурних рівнів у Чорноморській западині нагору та сприяє їхньому проникненню в приконтактові колектори верхньої крейди, палеоцену та еоцену північно-західного шельфу, що є важливим аспектом для розуміння шляхів підвищення результативності пошуково-розвідувальних робіт на нафту та газ у даному регіоні.*

Ключові слова: *система глибоководних підводних комплексів масопереносу (ПКМ), північно-західна частина Чорного моря, сейсморозвідка, секвенція, інтерпретація, міграція вуглеводнів.*

Вступ

Формування підводних комплексів масопереносу (ПКМ) – комплексне геологічне явище, яке характерне для відкладів Світового океану, що періодично виникає внаслідок механічної нестабільності континентальних схилів і провокується швидкими змінами рівня моря, тектонічними перебудовами, ростом внутрішньобасейнових підняттів і складок, землетрусами тощо. Для плейстоцен-голоценової епохи узбережжя Чорного моря добре відомі підводні обвали та сповзання порід по ослаблених глинистих верствах з переміщенням відірваних олістолітів / олістоплак і формуванням хаотичних осадових меланжів та уламкових потоків.

Нещодавно було визнано, що розвиток ПКМ є набагато потужнішим процесом, ніж вважалося раніше (Ogata, Festa, & Pini, 2020), тож він суттєво вплинув на геологічну будову осадової товщі середнього-пізнього неогену і пліоцену на більшій частині глибоководної частини Чорноморського басейну (Kitchka, Tyshchenko, & Iysenko, 2016; Tari et al., 2015, 2016; Tishchenko et al., 2021). Під час тематичної інтерпретації регіональних 2D сейсмічних даних, що охоплюють українську глибоководну частину Чорного моря, було виявлено повний спектр структурних умов ПКМ та пов'язаних з ними елементів розтягу, переносу та стиснення. Узагальнено сейсмофації, що пов'язані з ПКМ, показано на рис. 1.

Розгляд геологічної ситуації через концепцію ПКМ дає змогу трактувати швидкі падіння рівня Чорного моря в епоху середнього і пізнього міоцену як причину активації пришельфових розломів і формування підводних врізаних долин (Ольшанецький, & Єрмоленко, 2011), провокування нестабільності схилів і великомасштабних обвалів гірських порід, як передвісників прояву мессінської кризи в субокеанічному поясі Паратетісу, що розпочалася в меотисі і досягла свого апогею в середньопонтійський час.

Методи

Тематична інтерпретація регіональних сейсмічних даних 2D CDP (47 сейсмічних профілів завдовжки майже 10 000 км), отриманих для НАК "Нафтогаз України" у 2005 р. та переоброблених із застосуванням методу відновлення істинної амплітуди в ДП "Науканафтогаз", є ключовим елементом цього дослідження. Ця інтерпретація також підтверджується на даних по дещо щільнішій сейсмічній сітці 2D CDP, отриманій компанією "Western Geophysical" у 1994 р., хоча остання застосовувала інші параметри зйомки та методику обробки. За результатами

інтерпретації було виділено дві великомасштабні області композитних ПКМ: західний і східний амфітеатри накопичення відкладів транспорту мас, відповідно (рис. 2). Крім того, у цьому дослідженні було використано 3D сейсмічні дані площею 710 кв. км, оброблені в ДП "Науканафтогаз" на Одеському і Безіменному газових родовищах та прилеглих ділянках у 2009 р. для візуалізації тонкошарової будови цільових нафтогазоносних формацій з використанням методу спектральної декомпозиції з високою роздільною здатністю, переважно для вивчення внутрішньої архітектури заповнення врізаних долин.

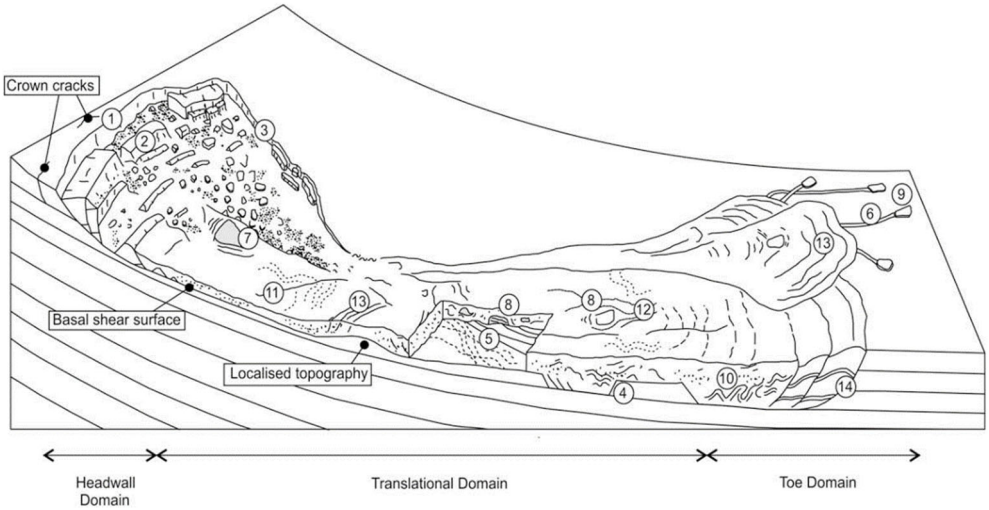


Рис. 1. Модель формування ПКМ (mass transport complex) (Bull et al., 2009):
1 – верхній уступ (ескарп) відриву; 2 – блоки, що утворилися в процесах розтягування і обвалу; 3 – бічні межі; 4 – рампи і флети поверхні ковзання; 5 – борозни вздовж поверхні ковзання; 6 – борозни, створені рухом олістолітів; 7 – останці (непереміщені блоки); 8 – переміщені блоки (класти, олістоліти); 9 – олістоліт-втікач у фронтальній частині; 10 – складки; 11 – окремі великі поздовжні зсуви; 12 – структури течії; 13 – гряди-складки в зоні гальмування потоку; 14 – складчасто-насувна зона. Crown cracks – закольні тріщини; basal shear surface – базальна поверхня зсуву; localised topography – місцеве узвишшя; headwall domain – зона ескарпу; translational domain – зона переміщення; toe domain – підошовна зона

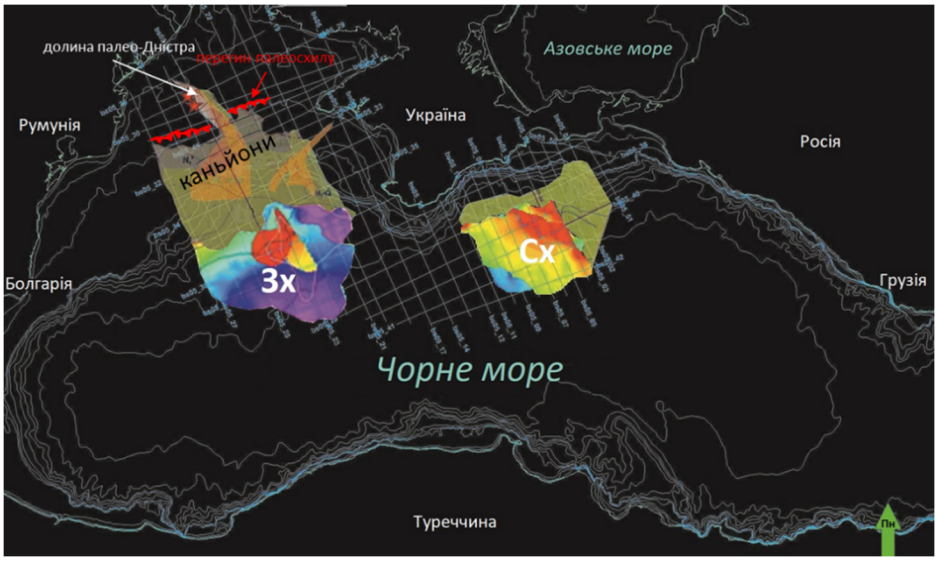


Рис. 2. Два великих композитних (середній міоцен-пліоцен та ранній плейстоцен) амфітеатри ПКМ (Західний (W) та Східний (E)) розташовані в українському глибоководному секторі Чорноморського басейну.
На рисунку згідно з (Ольшанецький, & Єрмоленко, 2011, зі змінами) вказано: Одеське та Безіменне газові родовища (*), палеошельф, прорізаний похованими каньйонами та алювіальними палеоруслами

Результати

Виділені середньоміоценові-пліоценові та ранньоплейстоценові ПКМ в Чорному морі. Найглибшим із закартованих є рівень ПКМ, пов'язаний з реперним горизонтом відбиття Ір, що приурочений до підошви парасеквенції вапнистих середньоміоценових глин.

У сейсмосеквенціях від середнього міоцену до верхнього пліоцену-раннього плейстоцену, у західному амфітеатрі ПКМ було виявлено ще шість основних рівнів ПКМ (рис. 3), на відміну від лише двох у східному, які виглядають молодшими (пізній міоцен – кімерій?), ніж у західному. З побудованих карт випливає, що західний театр ПКМ був більш розлогим і значно потужнішим та характеризувався великими недеформованими, насунутими і перевернутими тілами олістолітів, боковими рампами, седиментаційними язиками конусів прориву та потоками дебритів, вікнами зсувного відриву, нормальними скидами і флетами з когерентною складчастістю фацій

ПКМ, а також гармонійними внутрішньоформаційними складками (рис. 4) і меланжевими зім'ятими зонами вздовж фронтально розгалужених насувів, що супроводжуються підвернутими складками.

Припускається, що ці деформації контролюються горизонтом пластичних темних глин сарматського віку, під яким локалізована поверхня відшарування / ковзання. Ці результати добре корелюються з дослідженнями та інтерпретаціями, зробленими для Західночорноморського басейну в турецькому, болгарському та румунському секторах.

Піщані фації ПКМ і пов'язані з ними структурні особливості можуть бути колекторами для покладів вуглеводнів, хоча найбільш типові для ПКМ вапняні глинисті породи відіграють роль екрануючих порід, отже найбільш перспективними об'єктами розвідки є піщані турбідити і лопатеві віяла комплексу заповнення над ПКМ (Kitchka et al., 2021).

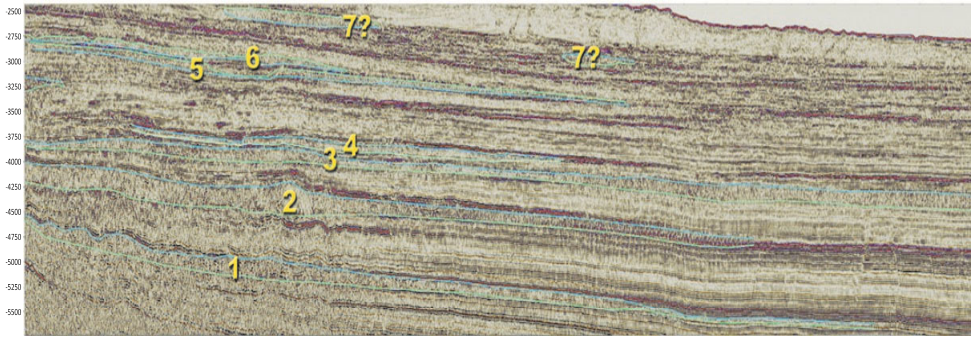


Рис. 3. Сейсмостратиграфічні одиниці середньоміоценових – нижньопліоценових – ранньоплейстоценових ПКМ (пронумеровані) в українському глибоководному секторі Західночорноморського суббасейну (ЗЧБ), сейсмопрофіль BS 05-23

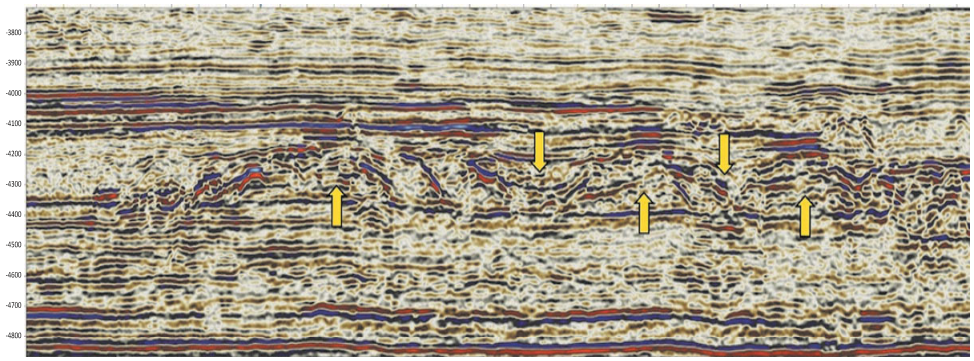


Рис. 4. Сейсмофації гармонійної складчастості у Західному амфітеатрі ПКМ, сеймопрофіль BS 05-37

Поховані річкові долини та підводні каньйони північно-західного шельфу та їх значення для розвідки вуглеводнів. Перші дані про врізані долини у межах північно-західного шельфу згадуються у виробничих звітах Причорноморської ДГРП на початку 80-х років минулого століття. Пізніші тематичні дослідження на нафту і газ (Khriachtchevskaia, Stovba, & Popadyuk, 2009; Ольшанецький, & Єрмоленко, 2011) виявили розгалужену і розвинену систему алювіальних русел палеорічок (див. рис. 5) і похованих схилових каньйонів, що прорізають кайнозойський осадовий чохол в Одеській затоці північно-західного шельфу, яка підтверджена як сучасними сейсмічними даними, так і даними пошуково-розвідувального буріння.

На сьогодні важливість дискордантних долин для розуміння структури та нафтогазоносного потенціалу Західночорноморської западини та її північно-західного шельфу зокрема є загальновизнаною (Tari et al., 2015). У деяких випадках каньйони можуть розділяти поклади перспективної ділянки (наприклад, середній еоцен Олімпійської антикліналі, який розсічений врізаною неогеновою долиною) і ускладнювати пошуково-розвідувальні роботи. З іншого боку, вони можуть виявитися ефективним каналом для подальшої висхідної міграції вуглеводнів від депоцентрів термічно зрілих товщ до периферійних пасток, діючи як живлячі "труби" для нафти і газу, оскільки базальні шари річкових долин зазвичай представлені високопроникним уламковим матеріалом.

Відновлюючись майже на тому самому місці протягом геологічного часу, поперечні долини чи каньйони (їхні тальвеги успадковані від глибинних розломних зон) заповнювалися уламковим матеріалом і ставали все глибшими і глибшими, наближаючись до краю континентального палеосхилу, послідовно прорізаючи більш давні верстви, щоб нарешті з'єднатися з турбідитовими віялами конусів виносу на підніжжі континентального схилу. Таким чином, долини та каньйони перехоплюють, локалізують і перерозподіляють висхідні потоки вуглеводнів (вздовж chimneys, або т. зв. труб дегазації), надаючи латеральний шлях до верхніх гіпсометричних рівнів, див. приклад на рис. 6 (мілководна газова аномалія вдвічі інтенсивніша в межах живлячих розломів, ніж в їхньому околі).

Порівнюючи українську частину з прилеглою румунською акваторію, було встановлено ті самі пісковики, що продуктивні над фронтом ПКМ на газових родовищах Доміно та Ліра (рис. 7).

Непроникні багаторівневі поверхні ПКМ виконують роль покришок нафти і газу, вони модулюють, акумулюють і відхиляють висхідні потоки вуглеводнів до периферії басейну (Sun et al., 2017; Constandache et al., 2023), а через вікна витоків похованих каньйонів і русел річок сприяють надходженню нафти і газу до шельфових утворень різної глибини і віку (рис. 8).

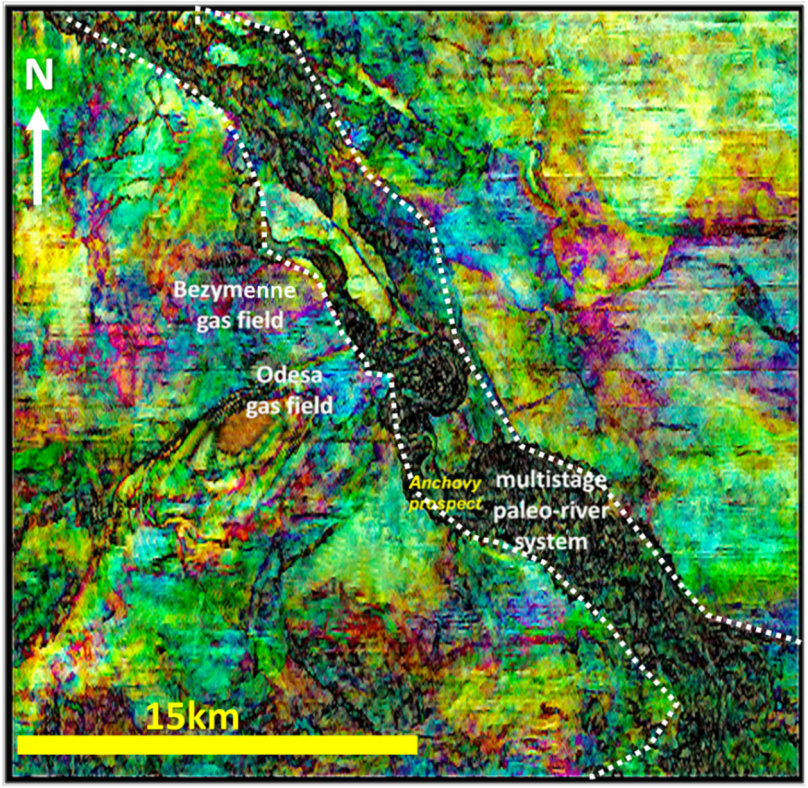


Рис. 5. Спектральна декомпозиція 3D-куба, що виявляє тонку меандруючу структуру похованої долини палео-Дністра(?) на зрізі 728 мс TWT, внутрішній шельф Одеської затоки.
Bezymenne gas field – Безіменне газове родовище; Odesa gas field – Одеське газове родовище; multistage paleo-river system – багаторівнева палеорічкова система; Anchovy prospect – пошуковий об'єкт Анчоус

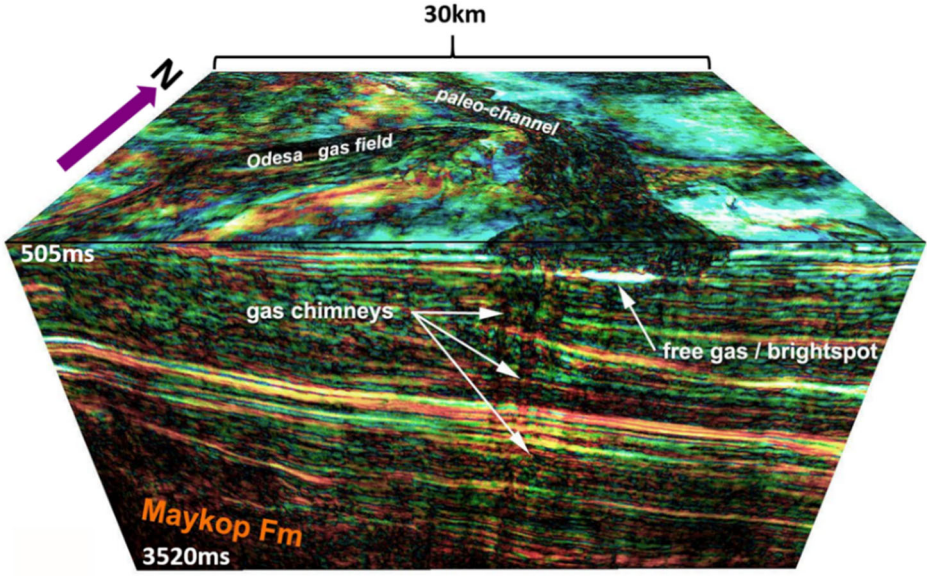


Рис. 6. 3D сейсмічний куб спектральної декомпозиції (зріз від 508 до 3948 мс), що показує мілководний газ (яскрава пляма), яка розташована на дні проксимального палеофану на глибині ~755 м і підживлюється каналами дегазації, що контролюються Одеським трансформним розломом.
Odesa gas field – Одеське газове родовище; paleo-channel – палео-канал; gas chimneys – канали дегазації; free gas/brightspot – вільний газ/яскрава пляма; Maykop Fm – Майкопська серія

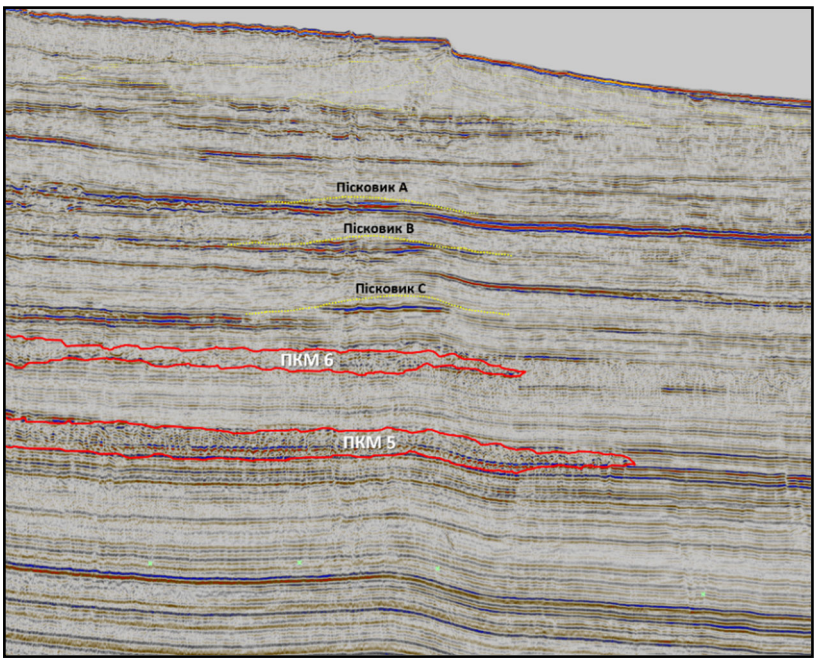


Рис. 7. Імовірно газонасичені пісковики комплексу заповнення над фронтом ПКМ (червоні контури) в глибоководній частині українського сектору Чорного моря

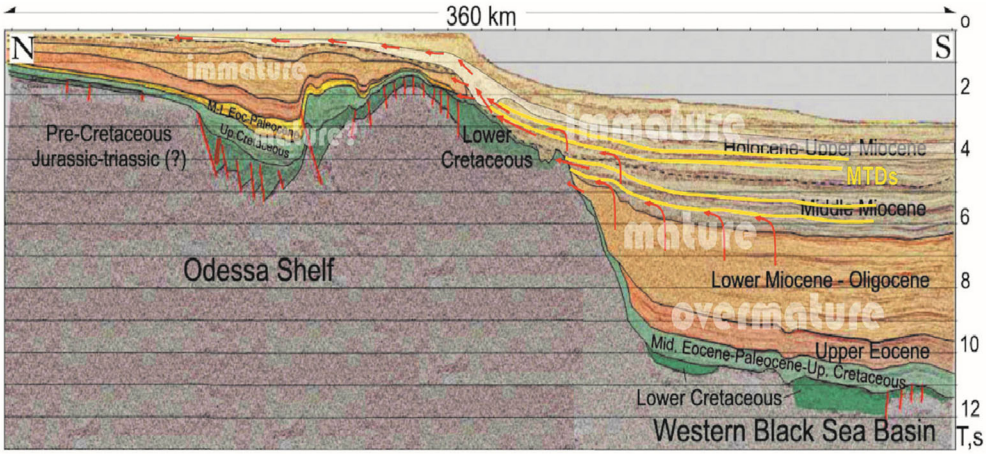


Рис. 8. Принципова модель міграції ВВ зі зрілого глибоководного басейну до менш зрілого північно-західного шельфу, розріз за (Khriachtchevskaia O. et al 2009) зі змінами; червоні стрілки вказують напрямки міграції вуглеводнів.
N – північ; S – південь; immature – незрілий; mature – зрілі; overmature – перезрілі; Odesa Shelf – одеський шельф; Western Black Sea Basin – Західночорноморський басейн; Pre-Cretaceous Jurassic-Triassic(?) – докрейдовий юрсько-тріасовий(?); M-L. Eoc-Paleocene – середній-верхній еоцен та палеоцен; Up. Cretaceous – верхня крейда; Lower Cretaceous – нижня крейда; Holocene-Upper Miocene – голоцен-верхній міоцен; Middle Miocene – середній міоцен; Lower Miocene-Oligocene – нижній міоцен-олігоцен; Upper Eocene – верхній еоцен; MTDs (mass transport deposits) – комплекси масопереносу

Дискусія і висновки

1. Встановлено, що басейн Чорного моря характеризується потужним розвитком підводних комплексів масопереносу і підводних каньйонів протягом середнього-пізнього міоцену і раннього плейстоцену.

2. З'ясовано, що підводні комплекси масопереносу, поховані підводні каньйони та система палео-річок з відповідними структурними елементами та літологічними різновидами забезпечують ефективні шляхи міграції та пасткові умови для скупчень вуглеводнів, що мігрують латерально вгору по схилу осадового басейна.

3. Вперше представлено, що суміщення зрілих материнських порід майкопу з більш давніми породами-колекторами по крайовій зоні розломів північно-західного палеошельфу, а також зон її перетину врізаними долинами створює ефективну дренажну мережу для заповнення різноманітних пасток у колекторах від нижньої крейди до верхнього пліоцену, що створює сприятливі шанси для знаходження промислових скупчень ВВ досить далеко на північ і захід від зони нафтогенерації Каркінітського прогину.

4. Вперше в українській частині Чорного моря визначені аналоги трьох рівнів пісковиків, які є продуктивними над фронтом ПКМ на газових родовищах Доміно та Ліра (Румунія).

Внесок авторів: Андрій Тищенко – концептуалізація, методологія, інтерпретація сейсмічних даних, написання, висновки; Олександр Кичка – геологічна основа проведених досліджень, методологія, написання (оригінальна чернетка), формальний аналіз; Андрій Вижва – валідація даних, формальний аналіз, внесення доповнень до статті, написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

Ольшанецький, М. В., & Єрмоленко О. В. (2011). Кайнозойські руслово-дельтові комплекси в межах української частини Чорного моря. *Проблеми нафтогазової промисловості,* 9, 28–35.

Bull, S., Cartwright, J., & Huuse, M. (2009). A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data. *Marine and Petroleum Geology,* 26, 1132–1151. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.09.011.

Constandache, D., Collier, T., Fallah, M., Tari, G., Caixeta, L., & Gariteai, T. (2023). How mass transport deposits influence the biogenic gas prospectivity of the Black Sea Basin, offshore Bulgaria. *Ext. abs. 84th EAGE Annual Conference & Exhibition, Jun 2023,* Vol. 2023, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202310664.

Khriachtchevskaia, O., Stovba, S., & Popadyuk, I. (2009). Hydrocarbon prospects in the Western Black Sea of Ukraine. *Leading Edge,* 28(9), 1024–1029. https://doi.org/10.1190/1.3236371.

Kitchka, A., Tyshchenko, A., & Lysenko, V. (2016). Mid-late Miocene Sea level Falls, Gas Hydrates Decay, Submarine Sliding, and Tsunamites in the Black Sea Basin. *Ext. Abs. 78th EAGE Conference, Vienna, Austria, 30 May – 2 June 2016.* https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600609.

Kitchka, A., Tyshchenko, A., & Tauvers, P. (2021). Post-Maikop System of Mass-Transport Complexes, Submarine Canyons and Turbidite Hydrocarbon Reservoirs in the NW Black Sea, Ukraine. *Ext. abs. International Scientific Congress on Offshore Petroleum Exploration: Black Sea (ISCOPE), 1–2 June 2021, Turkey.*

Ogata, K., Festa, A., & Pini, G. A. (2020). Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles. Eds. American Geophysical Union – John Wiley & Sons.

Sun, Q., Alves, T., Xie, X., He, J., Li, W., & Ni, X. (2017). Free gas accumulations in basal shear zones of mass-transport deposits (Pearl River Mouth Basin, South China) An important geohazard on continental slope basins. *Marine and Petroleum Geology,* 81, 17–32. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.12.029.

Tari, G., Fallah, M., Kosi, W., Floodpage j., Baur j., Bati Z., & Sipahioğlu, N. Ö. (2015). Is the impact of the Messinian Salinity Crisis in the Black Sea comparable to that of the Mediterranean? *Marine and Petroleum Geology,* 66(1), 135–148. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.021.

Tari, G., Fallah, M., Schell, C., Kosi, W., Bati, Z., Sipahioğlu, N. Ö., Krezsek, Cs., Schleder, Zs., Kozhuharov, E., & Kitchka, A. (2016). Why are there no Messinian evaporites in the Black Sea? *Petroleum Geoscience,* 22, 381–391. https://doi.org/10.1144/petgeo2016-003.

Tishchenko, I., Tari, G., Fallah, M., & Floodpage, J. (2021). Submarine landslide origin of a tsunami at the Black Sea coast: Evidence based on swath bathymetry and 3D seismic reflection data. *Interpretation,* 9(2), SB67-SB78. https://doi.org/10.1190/INT-2020-0174.1.

References

Bull, S., Cartwright, J., & Huuse, M. (2009). A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data. *Marine and Petroleum Geology,* 26, 1132–1151. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.09.011.

Constandache, D., Collier, T., Fallah, M., Tari, G., Caixeta, L., & Gariteai, T. (2023). How mass transport deposits influence the biogenic gas prospectivity of the Black Sea Basin, offshore Bulgaria. *Ext. abs. 84th EAGE Annual Conference & Exhibition, Jun 2023,* Vol. 2023, 1–5. https://doi.org /10.3997/2214-4609.202310664.

Khriachtchevskaia, O., Stovba, S., & Popadyuk, I. (2009). Hydrocarbon prospects in the Western Black Sea of Ukraine. *Leading Edge,* 28(9), 1024–1029. https://doi.org/10.1190/1.3236371.

Kitchka, A., Tyshchenko, A., & Lysenko, V. (2016). Mid-late Miocene Sea level Falls, Gas Hydrates Decay, Submarine Sliding, and Tsunamites in the Black Sea Basin. *Ext. Abs. 78th EAGE Conference, Vienna, Austria, 30 May – 2 June 2016.* https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600609.

Kitchka, A., Tyshchenko, A., & Tauvers, P. (2021). Post-Maikop System of Mass-Transport Complexes, Submarine Canyons and Turbidite Hydrocarbon Reservoirs in the NW Black Sea, Ukraine. *Ext. abs. International Scientific Congress on Offshore Petroleum Exploration: Black Sea (ISCOPE), 1–2 June 2021, Turkey.*

Ogata, K., Festa, A., & Pini, G. A. (2020). Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles. Eds. American Geophysical Union – John Wiley & Sons.

Olshanetskyi, M. V., & Yermolenko, O. V. (2011). Cenozoic channel-deltaic complexes in the Ukrainian part of the Black Sea. *Issues scientific works The oil and gas industry,* 9, 28–35 [in Ukrainian].

Sun, Q., Alves, T., Xie, X., He, J., Li, W., & Ni, X. (2017). Free gas accumulations in basal shear zones of mass-transport deposits (Pearl River Mouth Basin, South China) An important geohazard on continental slope basins. *Marine and Petroleum Geology,* 81, 17–32. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.12.029.

Tari, G., Fallah, M., Kosi, W., Floodpage j., Baur j., Bati Z., & Sipahioğlu, N. Ö. (2015). Is the impact of the Messinian Salinity Crisis in the Black Sea comparable to that of the Mediterranean? *Marine and Petroleum Geology,* 66(1), 135–148. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.021.

Tari, G., Fallah, M., Schell, C., Kosi, W., Bati, Z., Sipahioğlu, N. Ö., Krezsek, Cs., Schleder, Zs., Kozhuharov, E., & Kitchka, A. (2016). Why are there no Messinian evaporites in the Black Sea? *Petroleum Geoscience,* 22, 381–391. https://doi.org/10.1144/petgeo2016-003.

Tishchenko, I., Tari, G., Fallah, M., & Floodpage, J. (2021). Submarine landslide origin of a tsunami at the Black Sea coast: Evidence based on swath bathymetry and 3D seismic reflection data. *Interpretation,* 9(2), SB67-SB78. https://doi.org/10.1190/INT-2020-0174.1.

Отримано редакцією журналу / Received: 01.07.24
Прорецензовано / Revised: 26.11.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Andrii TYSHCHENKO, PhD (Geol.), Project Manager
ORCID ID: 0000-0001-9640-2300
e-mail: Tyshchenko@naftogaz.com
NJSC Naftogaz of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Oleksandr KITCHKA, Chief Specialist
ORCID ID: 0000-0003-1545-8738
e-mail: oleksandr.kychka@ugv.com.ua
Ukrainian Research Institute of Natural Gases, Kyiv, Ukraine

Andrii VYZHVA, PhD (Phys. & Math.), Chief Specialist
ORCID ID: 0009-0003-6699-5848
e-mail: andrii.vyzhva@ugv.com.ua
Ukrainian Research Institute of Natural Gases, Kyiv, Ukraine

SHELFAL PALEO-RIVER VALLEYS, SLOPE CANYONS, DEEPWATER FANS & MASS TRANSPORT DEPOSITS AND THEIR INFLUENCE ON HYDROCARBON MIGRATION TO THE NORTH-WESTERN SHELF OF THE BLACK SEA

Background. ***The tectonic evolution and structural constructions of the East European Platform offshore convergence zone, the Pre-Dobrogea foredeep on the Scythian Plate and the overlaid Meso-Cenozoic Black Sea Basin are particularly complicated. The presented research of this convergence zone spatially corresponds to the shallow inner part of the Black Sea northwestern shelf.***

Methods. ***A thematic geological interpretation of regional 2D CDP seismic data was performed, including 47 profiles with a total length of almost 10,000 km acquired for Naftogaz of Ukraine in 2005 and re-processed using the true amplitude reconstruction method. These structural constructions were complemented by the interpretation of slightly denser 2D CDP seismic data acquired by Western Geophysical in 1994, although the latter used different acquisition parameters and processing techniques.***

Results. ***For the first time based on the results of comprehensive studies, a large-scale system of deep-sea mass-transfer complexes of Neogene-Quaternary age was mapped within the Ukrainian northwestern part of the Black Sea and adjacent offshore. Based on the thematic interpretation, it was found that the deep-sea submarine mass transfer complex system in its plane slip bottom part forms a multi-level screen system on the way of upward hydrocarbon migration.***

A detailed geological interpretation of seismic and deep drilling data allowed us to identify a drainage network that combines reservoir turbidites and distal alluvial fans, as well as incised valley filling complex of the continental paleoslope and inner shelf buried river paleodunes.

Conclusions. ***The system of marginal high-amplitude normal faults at paleo-shelf hinge and erosion surfaces facilitates migration of hydrocarbons form lower to higher stratigraphic levels of deepwater domain and their permeation into adjusted paleo-shelf terrace through the contact with older reservoir in Upper Cretaceous, Paleocene and Eocene strata that is quite important issue for planning of exploration activity for oil and gas in this region.***

Keywords: ***mass transport deposits (MTDs), Northwestern Black Sea, exploration, sequences, interpretation, hydrocarbon migration.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 550.8.056
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.06

Сергій ВИЖВА[1], д-р. геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-4091-6649
e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Віктор ОНИЩУК[1], канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-2301-2202
e-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua

Дмитро ОНИЩУК[1,2], канд. геол. наук
ORCID ID: 0009-0000-7592-2104
e-mail: boenerges@ukr.net

Іван ОНИЩУК[1], канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0009-0004-0186-7578
e-mail: ivan.onyshchuk@knu.ua

Олександр ШАБАТУРА[1], д-р геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-0810-3701
e-mail: oshabatura@knu.ua

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
[2]ТОВ "Алкон Україна", Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНО-ЄМНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ УЩІЛЬНЕНИХ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ ТА СХІДНОГО СХИЛУ ЛЬВІВСЬКОГО ПАЛЕОЗОЙСЬКОГО ПРОГИНУ

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

Вступ. ***Висвітлено результати порівняння фільтраційно-ємнісних параметрів ущільнених теригенних порід карбону північного борту і центрального грабену Дніпровсько-Донецької западини та кембрію Львівського-палеозойського прогину перспективних ділянок на пошуки вуглеводнів. Мета досліджень полягала у вивченні та порівнянні петрофізичних параметрів ущільнених порід-колекторів досліджених площ як основи комплексного аналізу їх фізичних властивостей.***

Методи. ***Виконано визначення об'ємної густини зразків (сухих) шляхом зважування та вимірювання їх геометричних розмірів. Використовувався метод гідростатичного зважування зразків (насичених моделлю пластової води). Для визначення ваги зразків використовувались цифрові аналітичні ваги (точність ±0,001 г). Коефіцієнт відкритої пористості визначався газоволюметричним способом та методом гідростатичного зважування згідно із стандартною методикою. Капіляриметричні дослідження виконувалися шляхом центрифугування зразків. Для встановлення кореляційних зв'язків між ємнісними, електричними та акустичними параметрами порід в атмосферних і пластових умовах виконано комплекс петрофізичних досліджень із фізичним моделюванням пластових умов.***

Результати. ***Досліджено такі фільтраційно-ємнісні характеристики зразків порід, як коефіцієнт відкритої та ефективної пористості, коефіцієнт залишкового водонасичення та коефіцієнт проникності.***

Наведено межі змін та середні значення фільтраційно-ємнісних параметрів досліджених порід, а також їх порівняння. Виконано оцінку структури пустотного простору порід та їх аналіз на основі капіляриметричних досліджень способом центрифугування.

Висновки. ***За допомогою кореляційного аналізу встановлено ряд кореляційних залежностей між фільтраційно-ємнісними параметрами досліджених порід – густиною, коефіцієнтом пористості, коефіцієнтом ефективної пористості та коефіцієнтом залишкового водонасичення, а також між коефіцієнтами пористості, визначеними в атмосферних та пластових умовах. Ці залежності можуть бути використані при інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин та моделюванні фільтраційно-ємнісних параметрів ущільнених порід-колекторів.***

Ключові слова: ***алевроліти, пісковики, фільтраційно-ємнісні параметри, густина, коефіцієнти пористості, проникності та залишкового водонасичення, структура пустотного простору, кореляційні залежності.***

Вступ

Постановка проблеми. Покладам вуглеводнів в ущільнених колекторах належить особливе місце серед нетрадиційних джерел видобутку нафти та газу. Вони представлені слабопроникними, низькопористими гірськими породами (Михайлов та ін., 2014). Наявність нетрадиційних покладів вуглеводнів (газ ущільнених порід, сланцевий газ тощо) встановлено в багатьох регіонах світу, в тому числі в Дніпровсько-Донецькій западині (ДДЗ) і на Волино-Поділлі (Україна). Запаси вуглеводнів в ущільнених породах можуть у рази перевищувати ресурси традиційного типу (Михайлов та ін., 2018). Ущільнені породи в низці регіонів містять значну кількість органіки й можуть слугувати як материнськими породами, так і колекторами газу. Новітні технології видобутку газу на основі гідророзриву пласта змінили перспективність цих відкладів. З багатих на органіку ущільнених порід можна добувати газ у великих об'ємах і з економічно прийнятною за нинішніх умов собівартістю.

Ущільнені колектори за цілою низкою ознак відрізняються від порід традиційних родовищ нафти та газу. Для ущільнених колекторів характерне регіональне поширення. Значні поклади газу зосереджені в центральних, найбільш занурених частинах нафтогазових басейнів ("газ центральнобасейнового типу").

Під час вивчення ущільнених колекторів важливу роль відіграють геофізичні та петрофізичні дослідження, а також математичне моделювання, на основі яких визначаються напрямки для буріння горизонтального стовбура свердловини і параметри гідророзриву пласта.

У статті висвітлено фільтраційно-ємнісні параметри та порівняння ущільнених порід, представлених низькопористими пісковиками та алевролітами східного схилу Львівського палеозойського прогину (ЛПП) та Дніпровсько-Донецької западини (північний борт і

центральний грабен). Характеристика петрофізичних властивостей цих порід є одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ ущільнених колекторів, що зумовлює актуальність їх петрофізичного вивчення.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Вивченню фізичних властивостей порід нафтогазоперспективних районів України присвячена низка публікацій (Вижва та ін., 2013, 2014, 2017–2022 а, б; Vyzhva et al., 2017, 2019; Iuras et al., 2023; Карпенко, Башкіров, & Карпенко, 2014; Карпенко, Михайлов, & Карпенко, 2015; Маслов, Онищук, & Шинкаренко, 2017; Михайлов та ін., 2014, 2018; Нестеренко, 2010; Орлюк та ін., 2011, 2013, 2018; Orlyuk et al., 2018 а,б; Orlyuk, Marchenko, & Bakarjieva, 2021; Пашкевич, Орлюк, & Лебедь, 2014; Рибалка, & Карпенко, 2016; Соболь, & Карпенко, 2021) та багатьох інших авторів. Петрофізичні параметри порід мають важливе значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними свердловинних електрометричних та акустичних досліджень, тому їх лабораторним дослідженням приділяється значна увага. Водночас петрофізичні параметри порід і кореляційні залежності між ними мають досить виражений індивідуальний характер стосовно кожної ділянки досліджень. Отже, лабораторне визначення цих властивостей та встановлення відповідних кореляційних зв'язків між ними для кожної перспективної площі потребують виконання як окремих досліджень, так і окремого публічного висвітлення їх результатів.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. На сучасному етапі проблема пошуків та вивчення нетрадиційних джерел вуглеводнів на території України є надзвичайно актуальною, зважаючи на ситуацію з енергоносіями у світі. Тому дослідження петрофізичних властивостей гірських порід з метою оцінки перспективності геологічних структур і комплексів на вуглеводні має важливе значення. Як вже зазначалося, петрофізичні властивості порід необхідні під час інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень свердловин, а також для оцінки параметрів гідророзриву пласта.

Важливими є результати порівняльного аналізу даних петрофізичних досліджень ущільнених порід різних геологічних регіонів.

Слід відзначити, що, незважаючи на значну кількість відповідних публікацій, для ущільнених порід практично відсутні дані їх лабораторних фільтраційно-ємнісних досліджень і кореляційних залежностей між фільтраційно-ємнісними параметрами для конкретних площ і утворень. Така ситуація виникла тому, що до недавнього часу петрофізичні дослідження були спрямовані переважно на вивчення порід-колекторів традиційних джерел вуглеводнів, і петрофізичні параметри ущільнених порід є слабко вивченими або невивченими.

Мета досліджень. Метою даних досліджень було порівняння петрофізичних властивостей ущільнених теригенних порід-колекторів карбону перспективних ділянок Дніпровсько-Донецької западини – північний борт (ПБ ДДЗ) та центральний грабен (ЦГ ДДЗ) і відкладів кембрію східного схилу Львівського палеозойського прогину (ЛПГ) як основи комплексного аналізу їх фізичних параметрів.

Встановлено, що кореляційні зв'язки між ємнісно-фільтраційними параметрами і даними свердловинних та польових геофізичних методів є досить складними і потребують ретельного вивчення. Комплекс лабораторних петрофізичних досліджень – основа для визначення цих зв'язків. Дані, отримані в результаті лабораторних досліджень про зміни густини порід, їх питомого електричного опору, швидкості поширення пружних хвиль у них та їх кореляційні зв'язки із фільтраційно-ємнісними параметрами, використовуються для інтерпретації результатів електрометричних і акустичних методів досліджень свердловин, польової електророзвідки і сейсморозвідки.

Експериментальні петрофізичні дослідження виконано у НДЛ теоретичної і прикладної геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка. Комплексні лабораторні петрофізичні дослідження виконано за єдиною методикою, що дало змогу здійснити адекватне порівняння їх результатів. Комплекс петрофізичних досліджень включав визначення: густини порід; відкритої та ефективної пористості; структури капілярного простору; проникності; питомого електричного опору; швидкості пружних хвиль в атмосферних і пластових умовах. Усі лабораторні дослідження виконувались відповідно до чинних нормативних документів.

У статті наведено результати комплексних досліджень петрофізичних властивостей колекцій зразків порід Львівського палеозойського прогину і Дніпровсько-Донецької западини (північний борт і центральний грабен), а саме.

Львівський палеозойський прогин (східний схил) представлений 72 зразками ущільнених порід кембрію – пісковиків (63 зразки) і алевролітів (9 зразків), площі: Володимирська (інтервал глибин 2189–2525 м); Добротвірська (інтервал глибин 3236–3702 м); Лудинська (інтервал глибин 2760–3110 м); Ліщинська (інтервал глибин 3003–3222 м); Сокальська (інтервал глибин 2525–2609 м); Сушнівська (інтервал глибин 2408–2562 м). Досліджені породи ЛПП представлені пісковиками тонкозернистими, дрібнозернистими і середньозернистими, сірими та світло-сірими, а також алевролітами сірими.

Північний борт ДДЗ представлений 69 зразками ущільнених порід карбону – пісковиків (49 зразків) і алевролітів (20 зразків), площі: Аксютівська (інтервал глибин 3905–4033 м); Гашинівська (інтервал глибин 3398–3404 м); Дружелюбівська (інтервал глибин 2852–2857 м); Наріжнянська (інтервал глибин 3359–4186 м); Островерхівська (інтервал глибин 3780–4572 м). Досліджені породи ПБ ДДЗ представлені пісковиками дрібнозернистими і середньозернистими, кварцовими, білими та світло-сірими, а також алевролітами глинистими, світло-сірими, смугастими.

Центральний грабен ДДЗ представлений 115 зразками ущільнених порід карбону – пісковиків (96 зразків) і алевролітів (19 зразків), площі: Західношебелинська (інтервал глибин 4929–5491 м); Коломацька (інтервал глибин 5290–5650 м); Веселівська (інтервал глибин 3618–3761 м). Досліджені породи ЦГ ДДЗ представлені пісковиками дрібнозернистими і середньозернистими, сірими та світло-сірими, а також алевролітами слюдистими, світло-сірими смугастими.

Методи

Об'ємна густина досліджених порід у сухому стані визначалась шляхом зважування та вимірювання геометричних розмірів спеціальних лабораторних зразків циліндричної форми, а в насиченому стані (насичувалися моделлю пластової води – розчином NaCl) – застосовувався метод гідростатичного зважування за стандартною методикою попередньо насичених зразків (Дортман, 1992а, б; Инструкция …, 1977; Тиаб, & Доналдсон, 2009). Для визначення ваги зразків використовувались цифрові аналітичні ваги WPS 360/c/2 (точність ±0,001 г).

Коефіцієнт відкритої пористості визначався газоволюметричним способом та методом гідростатичного зважування згідно із стандартною методикою.

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

Для встановлення кореляційних зв'язків між ємнісними, електричними та акустичними параметрами порід в атмосферних і пластових умовах виконано комплекс петрофізичних досліджень із фізичним моделюванням пластових умов.

Результати

Аналіз даних лабораторних досліджень. Висвітлено результати виконаних комплексних лабораторних досліджень, визначено петрофізичні параметри ущільнених порід Львівського палеозойського прогину, північного борту і центрального грабену ДДЗ. Як стандарт для порівняння використано петрофізичні параметри ущільнених порід центрального грабена ДДЗ, як найбільш глибоко занурених.

Відомості про межі змін та середні значення петрофізичних параметрів порід залежно від їх літології наведено у відповідних таблицях.

Густина. За результатами лабораторних визначень густини порід Львівського палеозойського прогину встановлено, що цей параметр сухих порід змінюється: для алевролітів від 2506 до 2750 кг/м^3 (середнє значення 2629 кг/м^3), а пісковиків – від 2336 до 2656 кг/м^3 (середнє значення 2524 кг/м^3). Густина порід, насичених моделлю пластової води, варіює в межах: для алевролітів – від 2516 до 2754 кг/м^3 (середнє значення 2648 кг/м^3), а пісковиків – від 2456 до 2670 кг/м^3 (середнє значення 2573 кг/м^3). Уявна мінералогічна густина алевролітів змінюється від 2623 до 2760 кг/м^3 (середнє значення 2685 кг/м^3), а пісковиків – від 2605 до 2706 кг/м^3 (середнє значення 2650 кг/м^3).

Результати лабораторних визначень густини сухих порід північного борту ДДЗ показали, що цей параметр змінюється: для алевролітів від 2232 до 2718 кг/м^3 (середнє значення 2573 кг/м^3), а пісковиків – від 2425 до 2673 кг/м^3 (середнє значення 2555 кг/м^3). Густина порід, насичених моделлю пластової води, варіює в межах: для алевролітів – від 2430 до 2727 кг/м^3 (середнє значення 2622 кг/м^3), а пісковиків – від 2482 до 2688 кг/м^3 (середнє значення 2599 кг/м^3). Уявна мінералогічна густина алевролітів змінюється від 2645 до 2740 кг/м^3 (середнє значення 2683 кг/м^3), а пісковиків – від 2629 до 2730 кг/м^3 (середнє значення 2664 кг/м^3).

За результатами лабораторних визначень густини порід центрального грабену ДДЗ встановлено, що цей параметр сухих порід змінюється: для алевролітів від 2535 до 2698 кг/м^3 (середнє значення 2652 кг/м^3), а пісковиків – від 2397 до 2663 кг/м^3 (середнє значення 2530 кг/м^3). Густина порід, насичених моделлю пластової води, варіює в межах: для алевролітів – від 2537 до 2705 кг/м^3 (середнє значення 2673 кг/м^3), а пісковиків – від 2500 до 2680 кг/м^3 (середнє значення 2589 кг/м^3). Уявна мінералогічна густина алевролітів змінюється від 2586 кг/м^3 до 2730 кг/м^3 (середнє значення 2699 кг/м^3), а пісковиків – від 2587 до 2754 кг/м^3 (середнє значення 2670 кг/м^3).

Широкі межі зміни густини свідчать про мінливість як літологічного складу досліджених порід, так і власне їх пористості (табл. 1).

У табл. 2 наведено результати порівняння значень густинних параметрів досліджених порід Львівського палеозойського прогину і північного борту ДДЗ з аналогічними параметрами порід центрального грабену ДДЗ.

Таблиця 1

Межі змін і середні значення густинних параметрів порід

Порода	Значення параметра	Львівський палеозойський прогин			Північний борт ДДЗ			Центральний грабен ДДЗ		
		Густина (сухі), кг/м^3	Густина (насич. NaCl), кг/м^3	Уявна густина мінералогічна, кг/м^3	Густина (сухі), кг/м^3	Густина (насич. NaCl), кг/м^3	Уявна густина мінералогічна, кг/м^3	Густина (сухі), кг/м^3	Густина (насич. NaCl), кг/м^3	Уявна густина мінералогічна, кг/м^3
Алевроліти	мін.	2506	2516	2623	2232	2430	2645	2535	2537	2586
	макс.	2750	2754	2760	2718	2727	2740	2698	2705	2730
	сер.	2629	2648	2685	2573	2622	2683	2652	2673	2699
Пісковики	мін.	2336	2456	2605	2425	2482	2629	2397	2500	2587
	макс.	2656	2670	2706	2673	2688	2730	2663	2680	2754
	сер.	2524	2573	2650	2555	2599	2664	2530	2589	2670

Таблиця 2

Порівняння* значень густинних параметрів порід Львівського палеозойського прогину і північного борту ДДЗ з аналогічними параметрами порід центрального грабену ДДЗ

Порода	Значення параметра	Львівський палеозойський прогин			Північний борт ДДЗ		
		Густина (сухі), %	Густина (насич. NaCl), %	Уявна густина мінералогічна, %	Густина (сухі), %	Густина (насич. NaCl), %	Уявна густина мінералогічна, %
Алевроліти	мін.	1,1	0,8	-1,4	12,0	4,2	-2,3
	макс.	-1,9	-1,8	-1,1	-0,7	-0,8	-0,4
	сер.	0,9	0,9	0,5	3,0	1,9	0,6
Пісковики	мін.	2,5	1,8	-0,7	-1,2	0,7	-1,6
	макс.	0,3	0,4	1,7	-0,4	-0,3	0,9
	сер.	0,2	0,6	0,7	-1,0	-0,4	0,2

Примітка: *у таблиці плюсові значення означають відносне зниження, а мінусові – відносне збільшення відповідного параметра порівняно з параметром порід центрального грабена ДДЗ у %.

Аналіз табл. 2 показує, що більшість густинних параметрів досліджених порід практично не відрізняються між собою, спостерігаються лише незначні варіації (до ±2 %).

Порівнюючи з аналогічними породами ЦГ ДДЗ, спостерігаємо відносне зменшення мінімального значення густини алевролітів ПБ ДДЗ (сухі – на 12 %; насичені – на 4,2 %) та збільшення їх мінералогічної густини (на 2,3 %). Середнє значення густини сухих алевролітів також знижене (на 3 %). Для пісковиків у сухому стані ЛПП спостерігається зниження мінімальних значень (на 2,5 %).

Пористість. Виділяють загальну, відкриту та ефективну пористість (Дортман, 1992а, б; Инструкция…, 1977; Тиаб, & Доналдсон, 2009). Коефіцієнт пористості один із головних параметрів, що характеризує пустотний простір породи. Цей параметр породи для кожного типу флюїду визначає його об'єм, що міститься в породі. Окрім того, важливими властивостями порід-колекторів є структура їх пустотного простору та вміст залишкової води, а також звивистість порових каналів. Лабораторні визначення цих параметрів дає змогу отримати інформацію про катагенетичні і діагенетичні процеси та про механізми, які діяли під час транспортування й відкладення осадового матеріалу, ущільнення й деформації осадків (Тиаб, & Доналдсон, 2009).

Слід відзначити, що ущільнені породи характеризуються зниженими значеннями пористості, у тому числі і досліджені у даній статті. Відомості про межі змін та середні значення коефіцієнтів пористості порід залежно від їх виду наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Межі змін і середні значення ємнісних параметрів порід

Порода	Значення параметра	Львівський палеозойський прогин				Північний борт ДДЗ				Центральний грабен ДДЗ			
		Коефіцієнт відкритої пористості, $k_п$		Коефіцієнт ефективної пористості, $k_{пе}$	Коефіцієнт пористості в пласт. ум., $k_{п,пл}$	Коефіцієнт відкритої пористості, $k_п$		Коефіцієнт ефективної пористості, $k_{пе}$	Коефіцієнт пористості в пласт. ум., $k_{п,пл}$	Коефіцієнт відкритої пористості, $k_п$		Коефіцієнт ефективної пористості, $k_{пе}$	Коефіцієнт пористості в пласт. ум., $k_{п,пл}$
		насич. азотом	насич. NaCl			насич. азотом	насич. NaCl			насич. азотом	насич. NaCl		
Алевроліти	мін.	0,009	0,004	0,001	0,003	0,013	0,008	0,0003	0,007	0,012	0,008	0,001	0,007
	макс.	0,047	0,038	0,014	0,035	0,076	0,074	0,005	0,06	0,07	0,048	0,011	0,035
	сер.	0,024	0,019	0,005	0,016	0,04	0,034	0,0026	0,028	0,023	0,018	0,005	0,014
Пісковики	мін.	0,014	0,013	0,001	0,008	0,022	0,013	0,0013	0,011	0,027	0,014	0,001	0,007
	макс.	0,103	0,096	0,015	0,091	0,095	0,087	0,0293	0,081	0,117	0,095	0,072	0,084
	сер.	0,056	0,047	0,007	0,043	0,052	0,041	0,0048	0,037	0,07	0,053	0,021	0,045

Значення коефіцієнта відкритої пористості (табл. 3) порід Львівського палеозойського прогину, визначеного газоволюметричним способом (насичення азотом), змінюються: для алевролітів від 0,009 до 0,047 (середнє значення 0,024), а для пісковиків – від 0,014 до 0,103 (середнє значення 0,056). Коефіцієнт відкритої пористості порід, визначений насиченням моделлю пластової води (розчином NaCl), змінюється: для алевролітів від 0,004 до 0,038 (середнє значення 0,019), а для пісковиків – від 0,013 до 0,096 (середнє значення 0,047).

Коефіцієнт відкритої пористості (табл. 3) порід північного борту ДДЗ, визначений газоволюметричним способом, змінюється: для алевролітів від 0,013 до 0,076 (середнє значення 0,040), а для пісковиків – від 0,022 до 0,095 (середнє значення 0,052). Цей параметр, визначений насиченням моделлю пластової води, змінюється: для алевролітів від 0,008 до 0,074 (середнє значення 0,034), а для пісковиків – від 0,013 до 0,087 (середнє значення 0,041).

Коефіцієнт відкритої пористості (табл. 3) порід центрального грабену ДДЗ, визначений газоволюметричним способом, змінюється: для алевролітів від 0,012 до 0,07 (середнє значення 0,023), а для пісковиків – від 0,027 до 0,117 (середнє значення 0,07). Коефіцієнт відкритої пористості порід, визначений насиченням моделлю пластової води, змінюється: для алевролітів від 0,008 до 0,048 (середнє значення 0,018), а для пісковиків – від 0,014 до 0,095 (середнє значення 0,053).

У табл. 4 наведено результати порівняння значень ємнісних параметрів досліджених порід Львівського палеозойського прогину і північного борту ДДЗ з аналогічними параметрами порід центрального грабену ДДЗ.

Таблиця 4

Порівняння* значень ємнісних параметрів порід Львівського палеозойського прогину і північного борту ДДЗ з аналогічними параметрами порід центрального грабену ДДЗ

Порода	Значення параметра	Львівський палеозойський прогин				Північний борт ДДЗ			
		Коефіцієнт відкритої пористості, $k_п$		Коефіцієнт ефективної пористості, $k_{пе}$, %	Коефіцієнт пористості в пласт. ум., $k_{п,пл}$, %	Коефіцієнт відкритої пористості, $k_п$		Коефіцієнт ефективної пористості, $k_{пе}$, %	Коефіцієнт пористості в пласт. ум., $k_{п,пл}$, %
		насич. азотом, %	насич. NaCl, %			насич. азотом, %	насич. NaCl, %		
Алевроліти	мін.	25,0	50,0	0,0	57,1	-8,3	0,0	70,0	0,0
	макс.	32,9	20,8	-27,3	0,0	-8,6	-54,2	54,5	-71,4
	сер.	-4,3	-5,6	0,0	-14,3	-73,9	-88,9	48,0	-100,0
Пісковики	мін.	48,1	7,1	0,0	-14,3	18,5	7,1	-30,0	-57,1
	макс.	12,0	-1,1	79,2	-8,3	18,8	8,4	59,3	3,6
	сер.	20,0	11,3	66,7	4,4	25,7	22,6	77,1	17,8

Примітка: *у таблиці плюсові значення означають відносне зниження, а мінусові – відносне збільшення відповідного параметра порівняно з параметром порід центрального грабена ДДЗ у %.

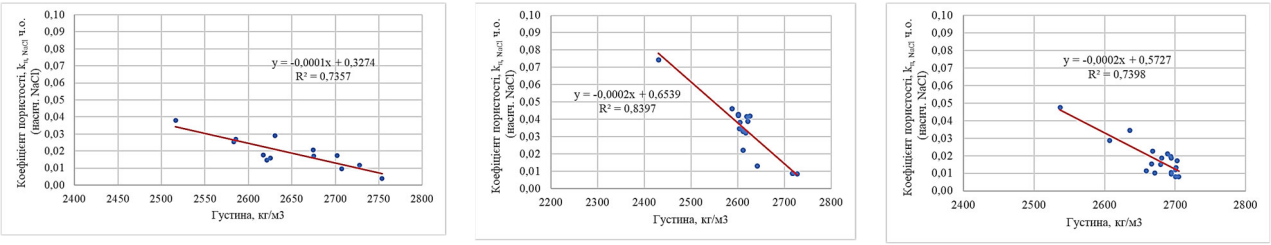
Аналіз табл. 4 показує, що наявна значна диференціація коефіцієнта відкритої пористості досліджених порід.

Для алевролітів ЛПП спостерігається відносне зменшення мінімального і максимального значення коефіцієнта відкритої пористості, визначеного насиченням азотом і водою в інтервалі 25–50 % і 32,9–20,8 % відповідно, водночас середнє значення цих параметрів збільшене на 4,3–5,6 %, якщо порівняти з відповідними параметрами алевролітів ЦГ ДДЗ. Для пісковиків також спостерігається відносне зниження мінімального

значення $k_п$ (на 48,1–7,1 %). Відносне зменшення максимального значення $k_п$ для алевролітів, насичених азотом, сягає 12 %, а насичених водою – практично не відрізняється. Водночас середнє значення цього параметра зменшене на 11,3–20 % порівняно з таким у пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 4).

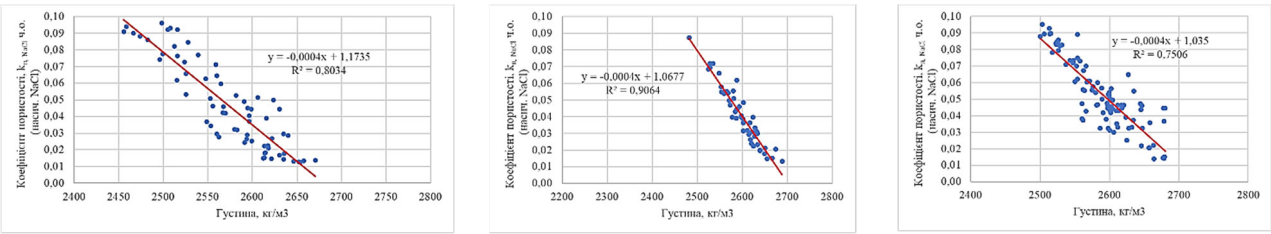
Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне зростання мінімального і максимального значення коефіцієнта відкритої пористості, визначеного насиченням азотом і водою (на 8,3–54,2 %), а середнє значення цього параметра зростає на 73,9–88,9 % порівняно такими у алевролітів ЦГ ДДЗ. Пісковики ПБ ДДЗ, навпаки, мають відносно знижені мінімальні і максимальні значення коефіцієнта відкритої пористості (на 18,5–7,1 % і 18,8–8,4 % відповідно) та його середнього значення (25,7–22,6 %) порівняно з такими у пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 4).

У результаті аналізу отриманих даних також встановлено кореляційні залежності між густиною досліджених порід (σ) та їх коефіцієнтом відкритої пористості ($k_{п,NaCl}$), які описуються лінійними функціями, графіки яких представлено на рис. 1 (алевроліти) та 2 (пісковики).



а) б) в)

Рис. 1. Залежність коефіцієнта відкритої пористості порід ($k_{п,NaCl}$), визначеного методом насичення розчином NaCl, від густини (σ) для алевролітів: а) ЛПП; б) ПБ ДДЗ; в) ЦГ ДДЗ



а) б) в)

Рис. 2. Залежність коефіцієнта відкритої пористості порід (kп,NaCl), визначеного методом насичення розчином NaCl, від густини (σ) для пісковиків: а) ЛПП; б) ПБ ДДЗ; в) ЦГ ДДЗ

Аналіз кореляційних залежностей коефіцієнта відкритої пористості порід від густини (рис. 1) показує, що коефіцієнти ***а*** і ***в*** у лінійному рівнянні для алевролітів ПБ ДДЗ не відрізняються, а для алевролітів ЛПП у два рази менші, ніж для аналогічних порід ЦГ ДДЗ. Для пісковиків аналогічні кореляційні залежності коефіцієнта відкритої пористості порід від густини (рис. 2) показують таке: коефіцієнти ***а*** для пісковиків усіх трьох районів досліджень однакові. Коефіцієнти ***в*** у кореляційному рівнянні відрізняються для пісковиків ЦГ ДДЗ від таких же значень ПБ ДДЗ на +3 %, а ЛПП – на +15 %.

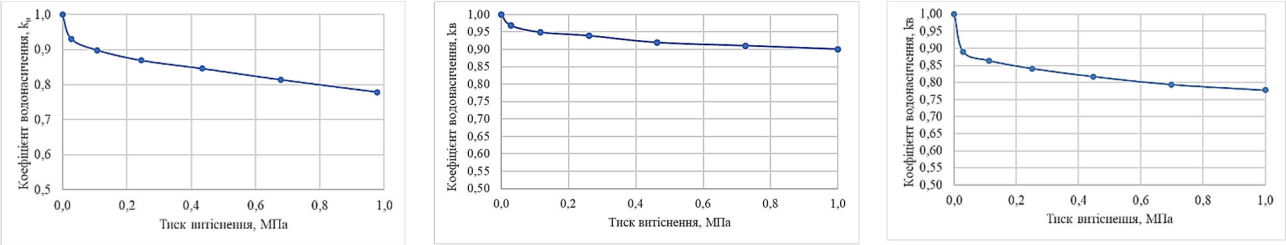
Структура пустотного простору порід значною мірою визначається: розмірами, формою й окатаністю зерен, їх сортуванням, орієнтуванням та типом упаковки, а також хімічним складом (Дортман, 1992а, б; Инструкция…, 1977; Тиаб, & Доналдсон, 2009). Аналіз кривих капілярного тиску (ККТ), отриманих за результатами центрифугування, дав змогу визначити коефіцієнти залишкового водонасичення ($k_{зв}$) та структуру пустотного простору ущільнених порід. Відомості про структуру пустотного простору і коефіцієнти залишкового водонасичення наведено в табл. 5.

Для прикладу на рис. 3 (алевроліти), 4 (пісковики) наведено типові криві капілярного тиску досліджених порід з різними фільтраційно-ємнісними властивостями ЛПП, ПБ ДДЗ та ЦГ ДДЗ.

Таблиця 5

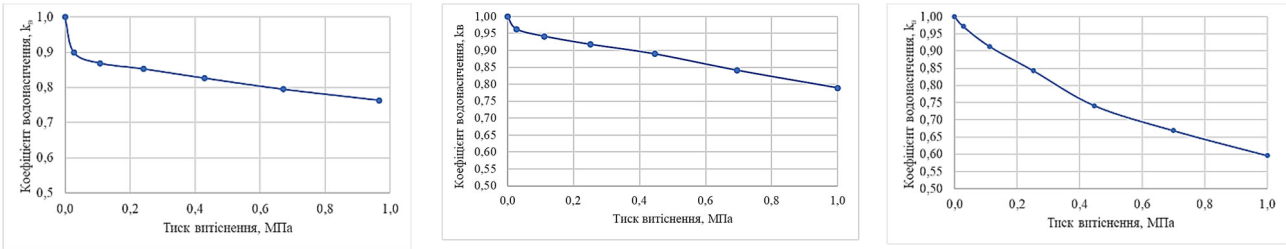
Межі змін і середні значення параметрів пустотного простору порід

Порода	Значення параметра	Львівський палеозойський прогин				Північний борт ДДЗ				Центральний грабен ДДЗ			
		Вміст пор, %			Коеф. залиш. водонасичення, $k_{зв}$	Вміст пор, %			Коеф. залиш. водонасичення, $k_{зв}$	Вміст пор, %			Коеф. залиш. водонасичення, $k_{зв}$
		надкапілярні	капілярні	субкапілярні		надкапілярні	капілярні	субкапілярні		надкапілярні	капілярні	субкапілярні	
Алевроліти	мін.	6	4	45	0,45	1	1	84	0,84	3	2	42	0,42
	макс.	23	46	87	0,87	6	11	97	0,97	27	31	98	0,98
	сер.	11	13	77	0,77	3	5	92	0,93	10	12	78	0,78
Пісковики	мін.	1	2	40	0,40	1	2	43	0,43	1	1	28	0,28
	макс.	38	48	98	0,98	18	40	96	0,96	37	64	99	0,99
	сер.	7	10	83	0,83	4	10	86	0,86	7	21	72	0,72



а) б) в)

Рис. 3. Типові криві капілярного тиску для алевролітів: а) ЛПП; б) ПБ ДДЗ; в) ЦГ ДДЗ



а) б) в)

Рис. 4. Типові криві капілярного тиску для пісковиків: а) ЛПП; б) ПБ ДДЗ; в) ЦГ ДДЗ

За допомогою аналізу кривих капілярного тиску для порід Львівського палеозойського прогину встановлено, що коефіцієнт залишкового водонасичення ущільнених порід змінюється: для алевролітів від 0,45 до 0,87 (середнє значення 0,77), а для пісковиків – від 0,40 до 0,98 (середнє значення 0,93), див. табл. 5.

З використанням коефіцієнта залишкового водонасичення для порід ЛПП визначено коефіцієнт ефективної пористості (табл. 3), який змінюється: для алевролітів від 0,001 до 0,014 (середнє значення 0,005), а для пісковиків – від 0,001 до 0,015 (середнє значення 0,007).

Аналіз даних лабораторних визначень коефіцієнта залишкового водонасичення ущільнених порід північного борту ДДЗ показав, що цей параметр змінюється: для алевролітів від 0,84 до 0,97 (середнє значення 0,93), а для пісковиків – від 0,43 до 0,96 (середнє значення 0,86), див. табл. 5.

З використанням коефіцієнтів залишкового водонасичення для порід північного борту ДДЗ визначено коефіцієнти ефективної пористості ($k_{п,еф}$). Коефіцієнт ефективної пористості (табл. 3), визначений за залишковим водонасиченням, змінюється: для алевролітів від 0,0003 до 0,0050 (середнє значення 0,0026), а для пісковиків – від 0,0013 до 0,0293 (середнє значення 0,0048).

В результаті аналізу ККТ встановлено, що коефіцієнт залишкового водонасичення ущільнених порід центрального грабена ДДЗ змінюється: для алевролітів від 0,42 до 0,98 (середнє значення 0,78), а для пісковиків – від 0,28 до 0,99 (середнє значення 0,72), див. табл. 5.

Коефіцієнт ефективної пористості порід центрального грабена ДДЗ (табл. 3), визначений з використанням коефіцієнта залишкового водонасичення, змінюється: для алевролітів від 0,001 до 0,011 (середнє значення 0,005), а для пісковиків – від 0,001 до 0,072 (середнє значення 0,021).

За результатами капіляриметричних досліджень виконано оцінку структури пустотного простору ущільнених порід за діаметром капілярів. Розподіл пустотного простору порід на субкапілярні (діаметр <0,2 мкм), капілярні (діаметр 0,2–3 мкм) та надкапілярні (діаметр 3–100 мкм) пори (Нестеренко, 2010) наведено в табл. 5. Слід відзначити, що субкапілярні пори участі у фільтрації флюїдів не беруть і зазвичай заповнені залишковою водою. Натомість флюїди, зосереджені у надкапілярних і капілярних порових каналах, можуть брати участь у фільтраційних процесах.

У результаті лабораторних капіляриметричних досліджень встановлено, що поровий простір досліджених порід Львівського палеозойського прогину має таку структуру: для пісковиків вміст надкапілярних пор змінюється від 1 до 38 % (середнє значення 7 %); вміст капілярних пор – від 2 до 48 % (середнє значення 10 %); вміст субкапілярних пор – від 40 до 98 % за середнього значення 83 %; для алевролітів вміст надкапілярних пор змінюється від 6 до 23 % (середнє значення 11 %); вміст капілярних пор – від 4 до 46 % (середнє значення 13 %); вміст субкапілярних пор – від 45 до 87 % (середнє значення 77 %), див. табл. 5.

Поровий простір порід північного борту ДДЗ має таку структуру: для алевролітів вміст надкапілярних пор змінюється від 1 до 6 % (середнє значення 3 %); вміст капілярних пор – від 1 до 11 % (середнє значення 5 %); вміст субкапілярних пор – від 84 до 97 % (середнього значення 92 %); для пісковиків вміст надкапілярних пор змінюється від 1 до 18 % (середнє значення 4 %); вміст капілярних пор – від 2 до 40 % (середнє значення 10 %); вміст субкапілярних пор – від 43 до 96 % (середнє значення 86 %), див. табл. 5.

Встановлено, що поровий простір досліджених порід центрального грабена ДДЗ має таку структуру: для алевролітів вміст надкапілярних пор змінюється від 3 до 27 % (середнє значення 10 %); вміст капілярних пор – від 2 до 31 % (середнє значення 12 %); вміст субкапілярних пор – від 42 до 98 % (середнє значення 78 %); для пісковиків вміст надкапілярних пор змінюється від 0 до 37 % (середнє значення 7 %); вміст капілярних пор – від 1 до 64 % (середнє значення 21 %); вміст субкапілярних пор – від 28 до 99 % (середнє значення 72 %), див. табл. 5.

У табл. 6 наведено результати порівняння параметрів пустотного простору досліджених порід Львівського палеозойського прогину і північного борту ДДЗ з відповідними породами центрального грабену ДДЗ.

Таблиця 6

Порівняння* параметрів пустотного простору порід Львівського палеозойського прогину і північного борту ДДЗ з аналогічними параметрами порід центрального грабену ДДЗ

Порода	Значення параметра	Львівський палеозойський прогин				Північний борт ДДЗ			
		Відносний вміст пор, %			Коеф. залиш. водонасичення, $k_{зв}$, %	Відносний вміст пор, %			Коеф. залиш. водонасичення, $k_{зв}$, %
		надкапілярні	капілярні	субкапілярні		надкапілярні	капілярні	субкапілярні	
Алевроліти	мін.	-100,0	-100,0	-7,1	-7,1	66,7	50,0	-100,0	-100,0
	макс.	14,8	-48,4	11,2	11,2	77,8	64,5	1,0	1,0
	сер.	-10,0	-8,3	1,3	1,3	70,0	58,3	-17,9	-19,2
Пісковики	мін.	0,0	-100,0	-42,9	-42,9	0,0	-100,0	-53,6	-53,6
	макс.	-2,7	25,0	1,0	1,0	51,4	37,5	3,0	3,0
	сер.	0,0	52,4	-15,3	-15,3	42,9	52,4	-19,4	-19,4

Примітка: *у таблиці плюсові значення означають відносне зниження, а мінусові – відносне збільшення відповідного параметра порівняно з параметром порід центрального грабена ДДЗ у %.

Аналіз матеріалів капілярометричних досліджень показує, що наявна значна диференціація відносного вмісту пор різних типів у породах ЛПП та ПБ ДДЗ, якщо порівняти із вмістом пор в аналогічних породах ЦГ ДДЗ (табл. 6).

В алевролітах ЛПП спостерігається відносне збільшення мінімального значення вмісту надкапілярних і капілярних пор (у два рази), а субкапілярних на 7,1 %; відносне зменшення максимального значення надкапілярних (на 14,8 %), субкапілярних (на 11,2 %) та відносне збільшення капілярних (на 48,4 %). Водночас середнє значення відносного збільшення вмісту надкапілярних пор становить 10 %, капілярних – 8,3 %, а субкапілярних – навпаки, зменшення на 1,3 % щодо алевролітів ЦГ ДДЗ (табл. 6).

Для пісковиків ЛПП спостерігається різноманітна картина: відносне збільшення мінімального значення вмісту капілярних пор на 100 %, а субкапілярних – на 42,9 % за однакового вмісту надкапілярних. Для максимальних значень пісковиків ЛПП: надкапілярні – відносне збільшення на 2,7 %; капілярні і субкапілярні – відносне зниження на 25 і 1 % відповідно, якщо порівняти з такими у пісковиках ЦГ ДДЗ. Водночас середнє значення відносного збільшення субкапілярних пор становить 15,3 %, відносне зменшення капілярних – 52,4 %, а надкапілярних – однакове з такими у пісковиках ЦГ ДДЗ (табл. 6).

В алевролітах ПБ ДДЗ спостерігається відносне зменшення мінімального значення вмісту надкапілярних і капілярних пор на 66,7 і 50 % відповідно, а субкапілярних – відносне збільшення у два рази; відносне зменшення максимального значення надкапілярних (на 77,8 %), капілярних (на 64,5 %), субкапілярних (на 1 %). Водночас середнє значення відносного зменшення вмісту надкапілярних пор становить 70 %, капілярних – 58,3 %, а субкапілярних – навпаки, збільшення на 17,9 % порівняно з такими у алевролітів ЦГ ДДЗ (табл. 6).

Для пісковиків ПБ ДДЗ спостерігається різноманітна картина: відносне збільшення мінімального значення вмісту капілярних пор на 100 %, а субкапілярних – на 53,6 % за однакового вмісту надкапілярних. Для максимальних значень пісковиків ПБ ДДЗ вміст: надкапілярні – відносне зменшення на 51,4 %; капілярні – 37,5 % і субкапілярні – 3 % порівняно з такими у пісковиках ЦГ ДДЗ. Водночас середнє значення відносного збільшення субкапілярних пор становить 19,4 %, відносне зменшення капілярних – 52,4 %, а надкапілярних – 49,2 %, якщо порівняти з такими для пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 6).

Аналіз отриманих матеріалів показує, що наявна значна диференціація коефіцієнта залишкового водонасичення ($k_{зв}$) алевролітів і пісковиків ЛПП і ПБ ДДЗ порівняно із значеннями $k_{зв}$ аналогічних порід ЦГ ДДЗ (табл. 6).

Спостерігається відносне збільшення мінімального значення коефіцієнта залишкового водонасичення алевролітів ЛПП (на 7,1 %) і зменшення максимального значення (на 11,2 %), водночас середнє значення цього параметра практично не відрізняється від значень для алевролітів ЦГ ДДЗ. Для пісковиків спостерігається відносне збільшення мінімального значення $k_{зв}$ на 42,9 % і практично незмінного максимального (зниження на 1 %), водночас середнє значення цього параметра збільшене на 15,3 % порівняно із значеннями для пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 6).

Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне збільшення мінімального (на 100 %) і середнього (на 19,2 %) та відносне зменшення максимального (на 1 %) значення коефіцієнта залишкового водонасичення порівняно з алевролітами ЦГ ДДЗ. Подібна картина спостерігається і для пісковиків ПБ ДДЗ – відносне збільшення мінімального (на 53,6 %) і середнього (на 19,4 %) та відносне зменшення максимального (на 3 %) значення коефіцієнта залишкового водо насичення, якщо порівняти із значеннями для пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 6).

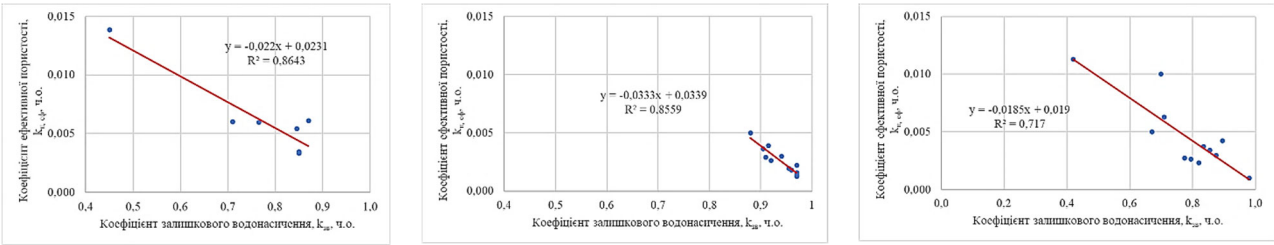
Аналіз отриманих матеріалів показує, що наявна значна диференціація коефіцієнта ефективної пористості алевролітів та пісковиків ПБ ДДЗ та пісковиків ЛПП порівняно з такими для аналогічних порід ЦГ ДДЗ (табл. 4).

Спостерігається відносне збільшення максимального значення коефіцієнта ефективної пористості алевролітів ЛПП (на 27,3 %), водночас мінімальне та середнє значення цього параметра не відрізняється від таких для алевролітів ЦГ ДДЗ. Для пісковиків спостерігається відносне зниження максимального значення коефіцієнта ефективної пористості на 79,2 %, мінімальне значення не відрізняється, а середнє значення цього параметра зменшене на 66,7 % порівняно з такими для пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 4).

Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне зменшення мінімального (на 70 %), максимального (на 54,5 %) та середнього (на 48 %) значення коефіцієнта ефективної пористості порівняно з такими для алевролітів ЦГ ДДЗ. Пісковики ПБ ДДЗ, навпаки, мають відносно знижені максимальні (на 59,3 %), середні (на 77,1 %) та збільшені мінімальні (на 30 %) значення коефіцієнта ефективної пористості порівняно з такими для пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 4).

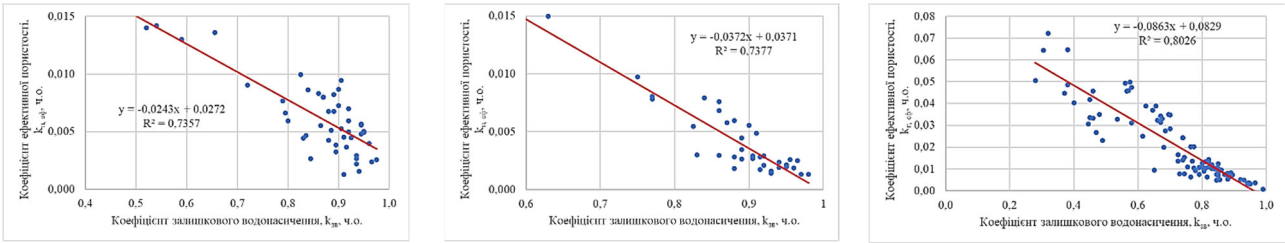
Встановлено кореляційні залежності між коефіцієнтом залишкового водонасичення ($k_{зв}$) і коефіцієнтом ефективної пористості порід ($k_{п,еф}$), що мають лінійний

характер, графіки яких представлено на рис. 5 (алевроліти) та 6 (пісковики). З досвіду петрофізичних досліджень слід відзначити, що кореляційні залежності між $k_{зв}$ і $k_{зв}$ порід-колекторів зазвичай нестійкі, а в деяких випадках їх не вдається встановити взагалі.



а) б) в)

Рис. 5. Залежність коефіцієнта ефективної пористості (кп,еф) від коефіцієнта залишкового водонасичення (kзв) для алевролітів: а) ЛПП; б) ПБ ДДЗ; в) ЦГ ДДЗ



а) б) в)

Рис. 6. Залежність коефіцієнта ефективної пористості ($k_{п,еф}$) від коефіцієнта залишкового водонасичення ($k_{зв}$) для пісковиків: а) ЛПП; б) ПБ ДДЗ; в) ЦГ ДДЗ

Аналіз кореляційних залежностей коефіцієнта ефективної пористості ($k_{п,еф}$) від коефіцієнта залишкового водонасичення ($k_{зв}$) (рис. 5) показує, що коефіцієнти ***а*** і ***в*** у лінійному рівнянні для алевролітів ПБ ДДЗ більші, ніж для аналогічних порід ЦГ ДДЗ, на 80 і 78 % відповідно, а для алевролітів ЛПП – на 19 і 21 % відповідно. Для пісковиків аналогічні кореляційні залежності коефіцієнта ефективної пористості від коефіцієнта залишкового водонасичення (рис. 6) показують таке: коефіцієнти ***а*** і ***в*** для пісковиків ПБ ДДЗ менші, ніж для аналогічних порід ЦГ ДДЗ, на 57 і 55 % відповідно, а для пісковиків ЛПП – на 72 і 33 % відповідно,.

Слід відзначити, що за структурою пустотного простору досліджені зразки порід здебільшого мають досить низькі ємнісні властивості, за винятком окремих зразків із середніми ємнісними параметрами.

Фізичне моделювання пластових умов виконано з використанням установки високого тиску ВСЦ-1000. У результаті цих досліджень визначено коефіцієнт пористості порід у пластових умовах ($k_{п,пл}$).

Залежно від глибини залягання порід Львівського палеозойського прогину при фізичному моделюванні пластових умов ефективний тиск $p_{еф}$ сягав 26–45 МПа, а температура t змінювалась у межах 60–100 °С. У результаті аналізу даних лабораторних досліджень пористості порід у змодельованих пластових умовах установлено, що цей параметр для алевролітів змінюється від 0,003 до 0,035 за середнього значення 0,016, а для ущільнених пісковиків – від 0,008 до 0,091 (середнє значення 0,043), див. табл. 3.

Згідно з глибиною залягання досліджених порід північного борту ДДЗ при фізичному моделюванні пластових умов ефективний тиск $p_{еф}$ сягав 41–55 МПа, а температура t змінювалась у межах 94–126 °С. Аналіз результатів лабораторних досліджень пористості порід у змодельованих пластових умовах показав, що цей параметр для алевролітів змінюється від 0,007 до 0,06 за середнього значення 0,028, а для ущільнених пісковиків – від 0,011 до 0,081 (середнє значення 0,037), див. табл. 3.

При фізичному моделюванні пластових умов, залежно від глибини залягання порід центрального грабена ДДЗ, ефективний тиск $p_{еф}$ сягав 60–70 МПа, а температура t змінювалась у межах 138–158 °С. У результаті аналізу даних лабораторних досліджень пористості порід у змодельованих пластових умовах встановлено, що цей параметр для алевролітів змінюється від 0,007 до 0,035 за середнього значення 0,014, а для ущільнених пісковиків – від 0,007 до 0,084 (середнє значення 0,045), див. табл. 3.

У результаті фізичного моделювання пластових умов відбувається закриття мікротріщин під навантаженням, що спричиняє зменшення пористості порід порівняно з їх пористістю в атмосферних умовах.

Аналіз отриманих даних показує, що відносне зниження (ε) коефіцієнта пористості порід Львівського палеозойського прогину за зміни атмосферних умов на пластові ($\varepsilon=(k_п–k_{п,пл})/k_п\cdot 100$ %) сягає: для досліджених алевролітів від 8,1 до 21,3 % (середнє значення 13,3 %), а для пісковиків – від 1,0 до 21,8 % (середнє значення 8,9 %).

Відносне зниження коефіцієнта пористості за зміни атмосферних умов на пластові досліджених порід північного борту ДДЗ сягає: для алевролітів – від 14 до 19,5 % (середнє значення 17 %), а для пісковиків – від 7,5 до 18 % (середнє значення 10,5 %).

Для порід центрального грабена ДДЗ відносне зниження коефіцієнта пористості за зміни атмосферних умов на пластові сягає: для алевролітів від 10 до 26,6 % (середнє значення 17,3 %), а для пісковиків – від 10 до 23,2 % (середнє значення 15,3 %).

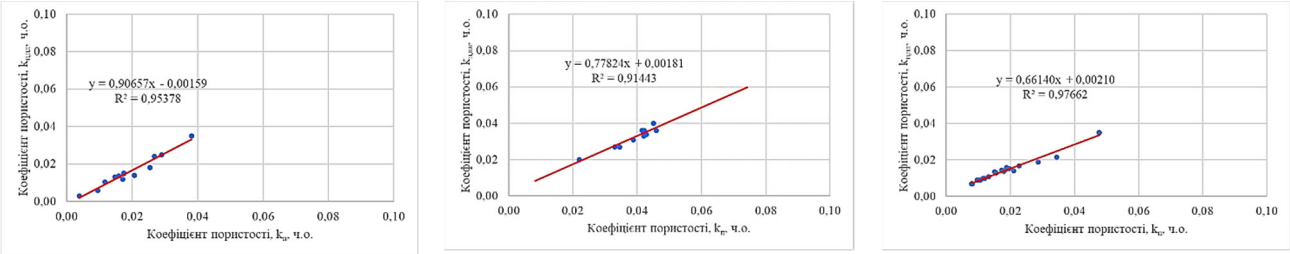
У табл. 4 наведено результати порівняння коефіцієнта пористості в пластових умовах досліджених порід Львівського палеозойського прогину і північного борту ДДЗ із цим параметром для відповідних порід центрального грабену ДДЗ.

Аналіз отриманих матеріалів показує, що наявна значна диференціація коефіцієнта пористості в пластових умовах алевролітів і пісковиків ПБ ДДЗ та пісковиків ЛПП порівняно з таким для аналогічних порід ЦГ ДДЗ (табл. 4).

Спостерігається відносне зменшення мінімального значення коефіцієнта пористості в пластових умовах алевролітів ЛПП (на 57,1 %), водночас максимальне значення цього параметра не відрізняється, а середнє збільшене на 14,3 % від відповідних значень для алевролітів ЦГ ДДЗ. Для пісковиків спостерігається відносне збільшення мінімального і максимального значення коефіцієнта пористості в пластових умовах на 14,3 і 8,3 % відповідно, а середнє значення цього параметра зменшене на 4,4 % порівняно з таким для пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 4).

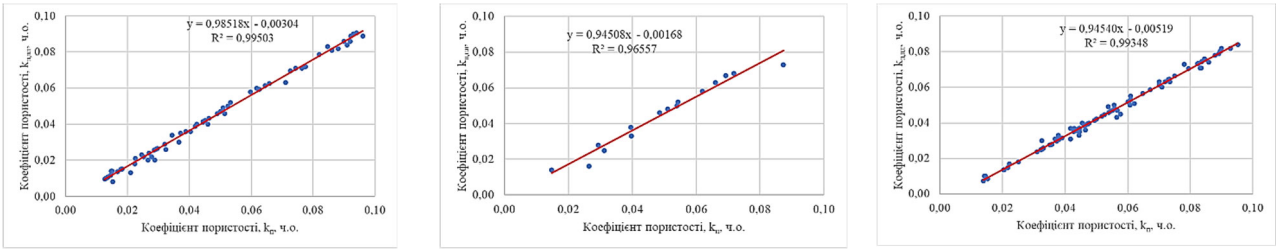
Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне збільшення максимального (на 71,4 %) та середнього (на 100 %) значення коефіцієнта пористості в пластових умовах, водночас мінімальне значення цього параметра не відрізняється порівняно з таким для алевролітів ЦГ ДДЗ. Пісковики ПБ ДДЗ, навпаки, мають відносно збільшені мінімальні (на 57,1 %) та збільшені мінімальні (на 3,6 %) і середні (на 17,8 %) значення коефіцієнта пористості в пластових умовах порівняно з таким для пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 4).

У результаті цих досліджень також отримано кореляційні залежності між коефіцієнтами пористості в атмосферних ($k_п$) і пластових ($k_{п,пл.}$) умовах, аналітичні вирази яких представлені лінійними функціями, а графіки – на рис. 7 (алевроліти) та 8 (пісковики).



а) б) в)

Рис. 7. Кореляційна залежність між коефіцієнтами пористості у атмосферних ($k_п$) і пластових ($k_{п,пл}$) умовах для алевролітів: а) ЛПП; б) ПБ ДДЗ; в) ЦГ ДДЗ



а) б) в)

Рис. 8. Кореляційна залежність між коефіцієнтами пористості у атмосферних (kп) і пластових (kп,пл) умовах для пісковиків: а) ЛПП; б) ПБ ДДЗ; в) ЦГ ДДЗ

Аналіз кореляційних залежностей коефіцієнта пористості в пластових умовах ($k_{п,пл}$) від коефіцієнта пористості в атмосферних умовах ($k_п$) (рис. 7) показує, що коефіцієнт ***а*** у лінійному рівнянні для алевролітів ПБ ДДЗ і ЛПП більший на 17,7 і 37,1 % відповідно, а коефіцієнт ***в*** менший на 13,8 і 24,3 % відповідно, ніж для аналогічних порід ЦГ ДДЗ. Для пісковиків аналогічні кореляційні залежності коефіцієнта пористості в пластових умовах від коефіцієнта пористості в атмосферних умовах (рис. 8) показують таке: коефіцієнт ***а*** для пісковиків ПБ ДДЗ практично однаковий, а для пісковиків ЛПП більший на 4,2 %, ніж для аналогічних порід ЦГ ДДЗ. Коефіцієнт ***в*** менший на 67,6 і 41,4 % відповідно.

Проникність гірських порід контролюється формою та розміром зерен породи, їх просторовим розподілом, а також упаковкою, ступенем глинистості, консолідації й цементації. На проникність суттєвий вплив спричиняє тип глинистого або іншого цементувального матеріалу між піщаними зернами, особливо у разі присутності води. Деякі глинисті мінерали, зокрема монтморилоніт і смектит, розбухають у воді і можуть частково або повністю закупорювати пустотний простір (Тиаб, & Доналдсон, 2009; Породы…, 1985).

Фізична здатність породи пропускати через себе флюїди характеризується коефіцієнтом проникності $k_{пр}$. Якщо порода на 100 % насичена одним флюїдом (фазою), таким як газ, нафта або вода, – визначається абсолютна проникність для даного флюїду. У разі присутності у породі більше одного флюїду, проникність для кожного з них є фазовою. У такому випадку визначаються коефіцієнти проникності $k_{прг}$, $k_{прн}$, $k_{прв}$, що характеризують ефективну фазову проникність для газу, нафти й води відповідно. У процесі руху по пустотних каналах пластові флюїди взаємодіють між собою, гальмуючи один одного, тому сума ефективної проникності всіх трьох фаз завжди менша від абсолютної проникності.

За літературними даними, коефіцієнт проникності порід-колекторів нафти і газу змінюється в діапазоні від 0,1 до 1000 фм^2, інколи й більше. Клас колектора зумовлюється його проникністю, що поділяється на: низьку – $k_{пр}$<1 фм^2, задовільну – $k_{пр}$=1–10 фм^2, середню – $k_{пр}$=10–50 фм^2, високу – $k_{пр}$=50–250 фм^2 і дуже високу – $k_{пр}$>250 фм^2 (Тиаб, & Доналдсон, 2009). Породи, що мають проникність нижчу за 1 фм^2, вважаються ущільненими. Низька проникність властива алевролітам, аргілітам, ущільненим газоносним пісковикам та матриці вапняків. Швидкість руху флюїду у продуктивному пласті визначає технологію видобутку вуглеводнів. Промислова розробка газоносних ущільнених порід можлива шляхом застосування технологій інтенсифікації

продуктивних товщ, таких як кислотна обробка та гідророзрив пласта. Ці заходи суттєво підвищують проникність ущільнених порід і дають змогу вести видобуток вуглеводнів із порід-колекторів, які раніше вважалися некондиційними.

Коефіцієнт проникності досліджених алевролітів і пісковиків визначали методом стаціонарної фільтрації азоту за допомогою спеціально розробленої установки (Породы…, 1985). У табл. 7 наведено межі змін і середні значення коефіцієнтів проникності алевролітів і ущільнених пісковиків.

У результаті аналізу результатів лабораторних досліджень коефіцієнта проникності порід ЛПП встановлено, що цей параметр змінюється: для аргілітів від 0,0001 до 2,927 фм^2 за його середнього значення 0,545 фм^2, а для пісковиків – від 0,002 до 4,689 фм^2 за його середнього значення 0,191 фм^2.

Коефіцієнт проникності порід ПБ ДДЗ змінюється: для аргілітів від 0,002 до 1,981 фм^2 за його середнього значення 0,279 фм^2, а для пісковиків – від 0,002 до 1,492 фм^2 за його середнього значення 0,176 фм^2.

Аналіз результатів лабораторних визначень коефіцієнта проникності порід ЦГ ДДЗ показує, що цей параметр змінюється: для аргілітів від 0,001 до 3,467 фм^2 за його середнього значення 0,685 фм^2, а для пісковиків – від 0,003 до 5,232 фм^2 за його середнього значення 0,462 фм^2.

У табл. 8 наведено результати порівняння коефіцієнта проникності досліджених порід ЛПП і ПБ ДДЗ з аналогічним параметром відповідних порід ЦГ ДДЗ.

Таблиця 7

Межі змін і середні значення проникності порід

Порода	Значення параметра	Львівський палеозойський прогин	Північний борт ДДЗ	Центральний грабен ДДЗ
		Коефіцієнт проникності $k_{пр}$, фм^2	Коефіцієнт проникності $k_{пр}$, фм^2	Коефіцієнт проникності $k_{пр}$, фм^2
Алевроліти	мін.	0,0001	0,002	0,001
	макс.	2,927	1,981	3,467
	сер.	0,545	0,279	0,685
Пісковики	мін.	0,002	0,002	0,003
	макс.	4,689	1,492	5,232
	сер.	0,191	0,176	0,462

Таблиця 8

Порівняння* значень коефіцієнта проникності порід Львівського палеозойського прогину і північного борту ДДЗ з аналогічним параметром порід центрального грабену ДДЗ в пластових умовах

Порода	Значення параметра	Львівський палеозойський прогин	Північний борт ДДЗ
		відмінність коефіцієнта проникності, %	відмінність коефіцієнта проникності, %
Алевроліти	мін.	-100,0	90,0
	макс.	42,9	15,6
	сер.	59,3	20,4
Пісковики	мін.	33,3	33,3
	макс.	71,5	10,4
	сер.	61,9	58,7

Примітка: *у таблиці плюсові значення означають відносне зниження, а мінусові – відносне збільшення відповідного параметра порівняно з параметром порід центрального грабена ДДЗ у %.

Аналіз отриманих матеріалів показує, що наявна значна диференціація коефіцієнта проникності алевролітів і пісковиків ЛПП та ПБ ДДЗ порівняно з таким для аналогічних порід ЦГ ДДЗ (табл. 8).

Спостерігається відносне збільшення мінімального значення коефіцієнта проникності алевролітів ЛПП (на 100 %), водночас максимальне значення цього параметра зменшене (на 42,9 %), а середнє також зменшене на 59,3 % від відповідних значень для алевролітів ЦГ ДДЗ. Для пісковиків спостерігається відносне зменшення мінімального, максимального і середнього значення коефіцієнта проникності, якщо порівняти зі значеннями пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 8), на 33,3, 71,5 і 61,9 % відповідно.

Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне зменшення мінімального, максимального і середнього значення коефіцієнта проникності на 90, 15,6 і 20,4 % відповідно порівняно з такими для алевролітів ЦГ ДДЗ. Пісковики ПБ ДДЗ також мають відносне зменшення мінімального, максимального і середнього значення коефіцієнта проникності, якщо порівняти зі значеннями пісковиків ЦГ ДДЗ (табл. 8), на 33,3, 10,4 і 58,7 % відповідно.

Дискусія і висновки

Лабораторні дослідження петрофізичних властивостей низькопористих пісковиків і алевролітів є актуальними щодо оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ ущільнених колекторів. У цій статті висвітлено фільтраційно-ємнісні параметри та їх порівняння ущільнених порід, представлених низькопористими пісковиками і алевролітами східного схилу Львівського палеозойського прогину та Дніпровсько-Донецької западини (північний борт та центральний грабен).

Як стандарт для порівняння використано петрофізичні параметри найбільш глибоко занурених ущільнених порід центрального грабена ДДЗ:

1. Визначено, що більшість густинних параметрів досліджених порід практично не відрізняються між собою, спостерігаються лише незначні варіації (до ±2 %).

Порівняно з густиною аналогічних порід ЦГ ДДЗ спостерігається відносне зменшення мінімального значення густини алевролітів ПБ ДДЗ (сухі – на 12 %; насичені – на 4,2 %) та збільшення їх мінералогічної густини (на 2,3 %). Середнє значення густини сухих алевролітів також знижене (на 3 %). Для пісковиків у сухому стані ЛПП спостерігається зниження мінімальних значень (на 2,5 %).

2. Наявна значна відносна диференціація коефіцієнтів відкритої пористості ($k_п$) досліджених порід порівняно з $k_п$ аналогічних порід ЦГ ДДЗ.

Для алевролітів ЛПП спостерігається відносне зменшення мінімального і максимального значення $k_п$,

визначеного насиченням азотом і водою в інтервалі 25–50 % і 32,9–20,8 % відповідно, а середнє значення цих параметрів збільшене на 4,3–5,6 %. Для пісковиків також спостерігається відносне зниження мінімального значення $k_п$ на 48,1–7,1 %. Відносне зменшення максимального значення $k_п$ для алевролітів, насичених азотом, сягає 12 %, а насичених водою практично не відрізняється. Середнє значення $k_п$ зменшене на 11,3–20 %.

Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне зростання мінімального і максимального значення $k_п$, визначеного насиченням азотом і водою (на 8,3–54,2 %), а середнє значення $k_п$ зростає на 73,9–88,9 %. Пісковики ПБ ДДЗ, навпаки, мають відносно знижені мінімальні і максимальні значення $k_п$ на 18,5–7,1 % і 18,8–8,4 % відповідно та його середнього значення на 25,7–22,6 %.

3. Наявна значна диференціація коефіцієнтів відкритої пористості в пластових умовах ($k_{п,пл}$) алевролітів, пісковиків ПБ ДДЗ та пісковиків ЛПП порівняно з $k_{п,пл}$ аналогічних порід ЦГ ДДЗ.

Спостерігається відносне зменшення мінімального значення $k_{п,пл}$ алевролітів ЛПП (на 57,1 %), водночас максимальне значення цього параметра не відрізняється, а середнє збільшене на 14,3 %. Для пісковиків спостерігається відносне збільшення мінімального і максимального значення $k_{п,пл}$ на 14,3 і 8,3 % відповідно, а середнє значення цього параметра зменшене на 4,4 %.

Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне збільшення максимального (на 71,4 %) та середнього (на 100 %) значення $k_{п,пл}$, водночас мінімальне значення цього параметра не відрізняється. Пісковики ПБ ДДЗ, навпаки, мають відносно збільшені мінімальні (на 57,1 %) та зменшені максимальні (на 3,6 %) і середні (на 17,8 %) значення $k_{п,пл}$.

4. В результаті аналізу кореляційних залежностей коефіцієнта відкритої пористості від густини порід встановлено, що коефіцієнти ***а*** і ***в*** у лінійному рівнянні для алевролітів ПБ ДДЗ не відрізняються, а для алевролітів ЛПП у два рази менші, ніж для аналогічних порід ЦГ ДДЗ. Для пісковиків аналогічні кореляційні залежності показують таке: коефіцієнт ***а*** для пісковиків всіх трьох районів досліджень однаковий. Коефіцієнти ***в*** у кореляційному рівнянні відрізняються для пісковиків ЦГ ДДЗ від таких же порід ПБ ДДЗ на +3 %, а ЛПП – на +15 %.

5. Встановлено, що наявна значна диференціація відносного вмісту пор різних типів у породах ЛПП та ПБ ДДЗ порівняно із вмістом пор в аналогічних породах ЦГ ДДЗ.

В алевролітах ЛПП спостерігається відносне збільшення мінімального значення вмісту надкапілярних і капілярних пор (у два рази), а субкапілярних на 7,1 %; відносне зменшення максимального значення надкапілярних (на 14,8 %), субкапілярних (на 11,2 %) та відносне збільшення капілярних (на 48,4 %). Водночас середнє значення відносного збільшення вмісту надкапілярних пор становить 10 %, капілярних – 8,3 %, а субкапілярних – навпаки, зменшення на 1,3 %.

Для пісковиків ЛПП спостерігається різноманітна картина. Відносне збільшення мінімального значення вмісту капілярних пор на 100 %, а субкапілярних – на 42,9 % за однакового вмісту надкапілярних. Для максимальних значень пісковиків ЛПП вміст: надкапілярні – відносне збільшення на 2,7 %; капілярні і субкапілярні – відносне зниження на 25 і 1 % відповідно. Водночас середнє значення відносного збільшення вмісту субкапілярних пор становить 15,3 %, відносне зменшення капілярних – 52,4 %, а надкапілярних – однакове щодо пісковиків ЦГ ДДЗ.

В алевролітах ПБ ДДЗ спостерігається відносне зменшення мінімального вмісту надкапілярних і капілярних пор, на 66,7 і 50 % відповідно, а субкапілярних – відносне збільшення у два рази; відносне зменшення максимального значення надкапілярних (на 77,8 %), капілярних (на 64,5 %), субкапілярних (на 1 %). Водночас середнє значення відносного зменшення вмісту надкапілярних пор становить 70 %, капілярних – 58,3 %, а субкапілярних – навпаки, збільшення на 17,9 %.

Для пісковиків ПБ ДДЗ спостерігається різноманітна картина. Відносне збільшення мінімального значення вмісту капілярних пор на 100 %, а субкапілярних – на 53,6 % за однакового вмісту надкапілярних. Для максимальних значень пісковиків ПБ ДДЗ вміст: надкапілярні – відносне зменшення на 51,4 %; капілярні – 37,5 % і субкапілярні – 3 %. Водночас середнє значення відносного збільшення субкапілярних пор становить 19,4 %, а відносне зменшення капілярних – 52,4 %, надкапілярних – 49,2 %.

6. Встановлено, що наявна значна диференціація коефіцієнта ефективної пористості ($k_{п,еф}$) алевролітів і пісковиків ПБ ДДЗ та пісковиків ЛПП порівняно з $k_{п,еф}$ аналогічних порід ЦГ ДДЗ.

Спостерігається відносне збільшення максимального значення $k_{п,еф}$ алевролітів ЛПП (на 27,3 %), водночас мінімальне та середнє значення цього параметра не відрізняється від $k_{п,еф}$ для алевролітів ЦГ ДДЗ. Для пісковиків спостерігається відносне зниження максимального значення $k_{п,еф}$ на 79,2 %, мінімальне значення не відрізняється, а середнє значення цього параметра зменшене на 66,7 % порівняно з такими для пісковиків ЦГ ДДЗ.

Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне зменшення мінімального (на 70 %), максимального (на 54,5 %) та середнього (на 48 %) значення $k_{п,еф}$ порівняно з такими для алевролітів ЦГ ДДЗ. Пісковики ПБ ДДЗ, навпаки, мають відносно знижені максимальні (на 59,3 %) і середні (на 77,1 %) та збільшені мінімальні (на 30 %) значення $k_{п,еф}$ порівняно з такими для пісковиків ЦГ ДДЗ.

7. Встановлено значну диференціацію коефіцієнта залишкового водонасичення ($k_{зв}$) алевролітів та пісковиків ЛПП і ПБ ДДЗ порівняно з $k_{зв}$ аналогічних порід ЦГ ДДЗ.

Спостерігається відносне збільшення мінімального значення $k_{зв}$ алевролітів ЛПП (на 7,1 %) і зменшення максимального значення (на 11,2 %), водночас середнє значення цього параметра практично не відрізняється від $k_{зв}$ алевролітів ЦГ ДДЗ. Для пісковиків спостерігається відносне збільшення мінімального значення $k_{зв}$ на 42,9 % і практично незмінного максимального (зниження на 1 %), водночас середнє значення цього параметра збільшене на 15,3 % порівняно з такими для пісковиків ЦГ ДДЗ.

Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне збільшення мінімального (на 100 %) і середнього (на 19,2 %) та відносне зменшення максимального значення $k_{зв}$ (на 1 %) порівняно з такими для алевролітів ЦГ ДДЗ. Подібна картина спостерігається і для пісковиків ПБ ДДЗ – відносне збільшення мінімального (на 53,6 %) і середнього (на 19,4 %) та відносне зменшення максимального значення $k_{зв}$ (на 3 %) порівняно з такими для пісковиків ЦГ ДДЗ.

8. Аналіз кореляційних залежностей $k_{п,еф}$ від $k_{зв}$ показує, що коефіцієнти ***а*** і ***в*** у лінійному рівнянні для алевролітів ПБ ДДЗ більші, ніж для аналогічних порід ЦГ ДДЗ, на 80 і 78 % відповідно, а для алевролітів ЛПП на 19 і 21 % відповідно. Для пісковиків кореляційні залежності $k_{п,еф}$ від $k_{зв}$ показують таке: коефіцієнти ***а*** і ***в*** для пісковиків ПБ ДДЗ менші, ніж для аналогічних порід ЦГ ДДЗ, на 57 і 55 % відповідно, а для пісковиків ЛПП на 72 і 33 % відповідно.

9. Встановлено, що наявна значна диференціація коефіцієнта проникності ($k_{пр}$) алевролітів та пісковиків ЛПП і ПБ ДДЗ порівняно з $k_{пр}$ аналогічних порід ЦГ ДДЗ.

Спостерігається відносне збільшення мінімального значення $k_{пр}$ алевролітів ЛПП (на 100 %), водночас максимальне значення цього параметра зменшене (на 42,9 %), а середнє також зменшене на 59,3 %. Для пісковиків спостерігається відносне зменшення мінімального, максимального і середнього значення $k_{пр}$ на 33,3, 71,5 і 61,9 % відповідно.

Для алевролітів ПБ ДДЗ загалом характерне відносне зменшення мінімального, максимального і середнього значення $k_{пр}$ на 90, 15,6 і 20,4 % відповідно. Пісковики ПБ ДДЗ також мають відносне зменшення мінімального, максимального і середнього значення $k_{пр}$ на 33,3, 10,4 і 58,7 % відповідно.

10. Таким чином, алевроліти та ущільнені пісковики досліджених площ мають переважно низькі і дуже низькі фільтраційно-ємнісні властивості, за винятком окремих зразків. Слід відзначити, що розробка таких колекторів неможлива без застосування методів інтенсифікації пласта.

11. Встановлені кореляційні залежності між фільтраційно-ємнісними параметрами досліджених порід – густиною, коефіцієнтом пористості, коефіцієнтом ефективної пористості та коефіцієнтом залишкового водонасичення, а також кореляційні залежності між коефіцієнтами пористості, визначеними в атмосферних та пластових умовах, можуть бути використані при інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин та моделюванні фільтраційно-ємнісних параметрів ущільнених порід-колекторів досліджених площ.

Внесок авторів: Сергій Вижва – концептуалізація, методологія; Віктор Онищук – аналіз і обробка даних, написання (перегляд і редагування); Іван Онищук – методологія, валідація даних, аналіз і обробка даних, методологія, написання (оригінальна чернетка); Дмитро Онищук – програмне забезпечення, формальний аналіз; Олександр Шабатура – програмне забезпечення, формальний аналіз.

Подяки, джерела фінансування. Роботу виконано в рамках держбюджетної теми № 24БП049-01.

Список використаних джерел

Вижва, С. А., Михайлов, В. А., Онищук, Д. І., & Онищук, І. І. (2013). Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону. *Геоінформатика*, 3(47), 17–25. https://www.geology.com.ua/wp-content/uploads/2015/04/4.pdf

Вижва, С. А., Михайлов, В. А., Онищук, Д. І., & Онищук, І. І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофизический журнал*, 36, 1, 145–157. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116163

Выжва, С. А., Михайлов, В. А., & Онищук, И. И. (2017). Петрофизические особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79, 12–20. https://doi.org/10.17721/17282713.79.02

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(83), 30–37. https://doi.org/10.17721/1728-2713.83.04

Вижва, С. А., Орлюк, М. І., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Друкаренко, В. В., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2019). Петрофізичні параметри порід візейського ярусу Лохвицької зони Дніпровсько-Донецької западини. *Геофизический журнал*, 41, 4, 145–160. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177380

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., Шабатура, О. В., & Олійник, О. В. (2020). Фільтраційно-ємнісні параметри нижньопермских карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського нафтогазового району Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(88), 25–33. http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2021) Фільтраційно-ємнісні параметри ущільнених порід північної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(94), 37–45. http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2022а). Колекторські властивості глибокозанурених ущільнених порід карбону центрального грабена ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(96), 11–19. https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.02

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2022б). Фільтраційно-ємнісні параметри ущільнених теригенних порід кембрію східного схилу Львівського палеозойського прогину. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(98), 33–41. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.04

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

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

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

Карпенко, О., Башкіров, Г., & Карпенко, І. (2014) Визначення вмісту органічної речовини в гірських породах за геофізичними даними. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(66), 71–76. https://doi.org/10.17721/1728-2713.66.12

Карпенко, О. М., Михайлов, В. А., & Карпенко, І. О. (2015). До прогнозу освоєння вуглеводневих ресурсів східної частини ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (68), 49–54. https://doi.org/10.17721/1728-2713.68.09

Маслов, Б. П., Онищук, І. І., & Шинкаренко, А. В. (2017). Моделювання нелінійних в'язко-пружних властивостей теригенно-вапняковистих пісковиків. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2 (77), 99–105. http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13

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

Михайлов, В. А., Карпенко, О. М., Курило, М. М. та ін. (2018). Горючі корисні копалини України та їхня геолого-економічна оцінка. ВПЦ "Київський університет".

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

Орлюк, М. И., & Пашкевич, И. К. (2011). Магнитная характеристика и разломная тектоника земной коры Шебелинской группы газовых месторождений как составная часть комплексных поисковых критериев углеводородов. *Геофизический журнал*, 33, 6, 136−151. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116799

Орлюк, М. И., & Друкаренко, В. В. (2013) Физические параметры пород осадочного чехла северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. *Геофизический журнал*, 35, 2, 127–136. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111356

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

Пашкевич, И. К., Орлюк, М. И., & Лебедь, Т. В. (2014). Магнитная неоднородность, разломная тектоника консолидированной земной коры и нефтегазоносность Днепровско-Донецкого авлакогена. *Геофизический журнал,* 36, 1, 64–80. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116163

Рибалка, С., & Карпенко, О. (2016). Колекторські властивості теригенних порід на великих глибинах центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(72), 56–59. https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08

Соболь, В., & Карпенко, О. (2021). Нова модель проникності теригенних гранулярних колекторів на прикладі турнейських відкладів Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(92), 61–66. http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09.

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

Iuras, S., Orlyuk, M., Levoniuk, S., Drukarenko, V., & Kruhlov, B. (2023). Unconventional shale gas potential of lower visean organic-rich formations in Glynsko-Solohivskyi petroleum region. *Geodynamics*, 1(34), 80–96. https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.080

Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I., & Solodkyi, E. (2018a). The association of physical properties of deep reservoirs with the geomagnetic field and fault-block tectonics in the hlynsko-solokhivskyi oil-and-gas region. *Geodynamics*, 2(25), 71–88. https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071

Orlyuk, M., Drukarenko, V., & Onyshchuk, I. (2018б). Physical properties of deep reservoirs of the Glinsko-Solokhivsky oil and gas region. *XII Міжнародна наукова конференція "Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища" 13–16 листопада 2018 р., Київ, Україна.*

Orlyuk, M. I., Marchenko, A. V., & Bakarjieva, M. I. (2021). Geomagnetic field of the western region of Ukraine in connection with the fracture-block

tectonics and hydrocarbon deposits//XXth International Conference on Geoinphormatics – Theoretical and Applied Aspects. 11–14 May, Kyiv, Ukraine. Paper 21067_ENG. Conference CD-ROM Proceedings. PP.186–192. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521067

Vyzhva, S., Maslov, B., Onyshchuk, I., & Kozionova, O. (2019). Hydraulic fracture crack propagation modeling in multi-component nonelastic geological media. *Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища, 12–15 листопада 2019, Київ, Україна*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903224

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

References

Dortman, N. B. (Ed.). (1992a). Petrophysics. Handbook (Vol. 1). Nedra [in Russian].

Dortman, N. B. (Ed.). (1992b). Petrophysics. Handbook (Vol. 2). Nedra [in Russian].

GSTU 41-00032626-00-025-2000. (2001). Coefficient of residual water saturation of rocks. Method of measuring measurements by centrifugation of samples. Kyiv: *Ministry of Natural Resources of Ukraine*, 19 p. [in Ukrainian].

Iuras, S., Orlyuk, M., Levoniuk, S., Drukarenko, V., & Kruhlov, B. (2023). Unconventional shale gas potential of lower visean organic-rich formations in Glynsko-Solohivskyi petroleum region. *Geodynamics*, 1(34), 80–96. https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.080

Karpenko, O., Bashkirov, G., & Karpenko, I. (2014). Geophysical data: Estimating organic matter in rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3(66). pp. 71–76. https://doi.org/10.17721/1728-2713.66.12 [in Ukrainian].

Karpenko, O., Mykhailov, V., & Karpenko, I. (2015). Eastern Dnieper-Donets depression: Predicting and developing hydrocarbon resources. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 68, 49–54. https://doi.org/10.17721/1728-2713.68.09 [in Ukrainian].

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

Mykhailov, V. A., Vyzhva, S. A., & Zagnitko, V. M., et al. (2014). *Unconvential sources of hydrocarbons in Ukraine. Eastern oil-gas-bearing region: Analytical investigations. Book IV.* Kyiv: Kyiv University Pablishing [in Ukrainian].

Mykhailov, V. A., Karpenko, O. M., Kurylo, M. M. та ін. (2018). Fossil fuels of Ukraine and their geological and economic evaluation. Kyiv: Kyiv University Pablishing [in Ukrainian].

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

Orlyuk, M., & Pashkevich, I. (2011). Magnetic characteristics and fault tectonics of the earth's crust of the Shebelinka group of gas fields as a component of the complex search criteria for hydrocarbons. *Geophysical journal,* 33, 6, 136−151. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116799 [in Russian].

Orlyuk, M. I., & Drukarenko, V. V. (2013) Physical parameters of rocks sedimentary cover of the northwestern part of the Dnieper-Donets depression. *Geophysical journal*, 35, 2, 127–136. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111356 [in Russian].

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

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

Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I., & Solodkyi, E. (2018б). The association of physical properties of deep reservoirs with the geomagnetic field and fault-block tectonics in the Hlynsko-Solokhivskyi oil-and-gas region. *Geodynamics*, 2(25), 71–88. https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071

Orlyuk, M. I., Marchenko, A. V., & Bakarjieva, M. I. (2021). Geomagnetic field of the western region of Ukraine in connection with the fracture-block tectonics and hydrocarbon deposits//XXth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. 11–14 May, Kyiv, Ukraine. Paper 21067_ENG. Conference CD-ROM Proceedings. PP.186–192. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521067

Paskevich, I. K., Orlyuk, M. I., & Lebed, T. V. (2014). Magnetic data, fault tectonics of consolidated earth crust and oil-and-gas content of the Dnieper-Donets avlakogen. *Geophysical journal*, Vol. 36, No 1, 64–80. https://journals.uran.ua/geofizicheskiy/article/view/116150/110237 [in Russian].

Rybalka, S., & Karpenko, O. (2016). Central part of the Dnieper-Donets Basin: Reservoir properties of deep-laid terrigenous rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 1(72), pp. 56–59. https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08 [in Ukrainian].

Sobol, V., & Karpenko, O. (2021). A new model of permeability of terrigenous granular reservoirs on the example of turney deposits of Yablunivske oil and gas condensate field of the Dnieper-Donets basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 1(92), 61–66. http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09 [in Ukrainian].

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

Vyzhva, S. A., Mykhailov, V. A., Onyshchuk, D. I., & Onyshchuk, I. I. (2013). Petrophysical parameters of unconventional types of reservoir rocks from southern oil-and-gas region. *Geoinformatics*, 3(47), 17–25. https://www.geology.com.ua/wp-content/uploads/2015/04/4.pdf [in Ukrainian].

Vyzhva, S. A., Mykhailov, V. A., & Onyshchuk, I. I. (2014). Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donets depression promising for shale gas. *Geophysical journal*, 36, 2, 145–157. https://journals.uran.ua/geofizicheskiy/article/view/116163/110243 [in Ukrainian].

Vyzhva, S, Mykhailov, V, & Onyshchuk, I. (2017). Petrophysical features of maikop series of the crimean-black sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 79, 12–20. https://doi.org/10.17721/17282713.79.02 [in Russian].

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

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Reva, M., & Shabatura, O. (2018). Reservoir features of the upper carbon sediments (Runovshchynska area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 4 (83), 30–37. https://doi.org/10.17721/1728-2713.83.04 [in Ukrainian].

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Orlyuk, M., Drukarenko, V., Reva, M., & Shabatura, O. (2019). Petrophysical parameters of rocks of the Visean stage (Lokhvytsky zone of the Dnieper-Donets Depression). *Geophysical journal*, 41, 4, 145–160. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177380 [in Ukrainian].

Vyzhva, S., Maslov, B., Onyshchuk, I., & Kozionova, O. (2019). Hydraulic fracture crack propagation modeling in multi-component nonelastic geological media. *XIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, November 12–15, Kyiv, Ukraine. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903224

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Oliinyk, O., Reva, M., & Shabatura, O. (2020). Lower permian carbonate deposits reservoir parameters of western part of Hlynsko-Solohivska area of Dnieper-Donets depression gas-oil-bearing district. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 1(88), 25–33. http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04 [in Ukrainian].

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2021) Porosity and permeability properties of consolidated rocks of the northern near edge zone of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3 (94), 37–45. http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04 [in Ukrainian].

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2022a). Reservoir properties of deep-seated consolidated rocks of carboniferous period of the central graben of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 1(96), 11–19. https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.02 [in Ukrainian].

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2022b). Reservoir properties of consolidated terrigenous rocks of cambrian period of the eastern slope of the Lviv paleozoic depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3(98), 33–41. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.04 [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 15.09.24
Прорецензовано / Revised: 27.10.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Serhii VYZHVA[1], DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-4091-6649
e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Viktor ONYSHCHUK[1], PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-2301-2202
e-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua

Dmytro ONYSHCHUK[1,2], PhD (Geol.),
ORCID ID: 0009-0000-7592-2104
e-mail: boenerges@ukr.net

Ivan ONYSHCHUK[1], PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0009-0004-0186-7578
e-mail: ivan.onyshchuk@knu.ua

Oleksandr SHABATURA[1], DSc (Geol.)
ORCID ID: 0000-0003-0810-3701
e-mail: oshabatura@knu.ua

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[2]Alcon Ukraine LLC, Kyiv, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF RESERVOIR PROPERTIES OF CONSOLIDATED TERRIGENOUS ROCKS OF DNIEPER-DONETSK DEPRESSION OF THE EASTERN SLOPE OF THE LVIV PALEOZOIC DEPRESSION

Background. ***The paper concerned the results of comparative analysis of the reservoir properties of consolidated terrigenous Carboniferous rocks of the northern and central graben of the Dnieper-Donetsk depression and the Cambrian of the Lviv Paleozoic downfold of promising hydrocarbons areas. The purpose of the research was to study and compare the petrophysical parameters of consolidated reservoir rocks of the studied areas as the basis of a comprehensive analysis of their physical properties.***

Methods. ***Determination of dry-bulk density of samples by their weighing and measuring their geometric dimensions. The method of hydrostatic weighing of the samples (saturated by model of the reservoir water) was used. Digital analytical scales (accuracy ±0,001 g) were used to determine the weight of samples. The open porosity factor was determined by the gas volumetric method and by the method of hydrostatic weighing according to the standard method. Capillametric studies were performed by centrifugation of samples. To establish correlation between the capacitive, electrical and acoustic parameters of rocks in atmospheric and reservoir conditions, a complex of petrophysical studies with physical modeling of formation conditions was performed.***

Results. ***Such reservoir parameters as the open porosity factor and void factor, permeability coefficient and residual water saturation factor have been studied. The article presents the limits of changes and the average values of reservoir properties of rocks, and their comparison. On the basis of capillarimetric research, an evaluation of the structure of the void space of rocks was made.***

Conclusions. ***The correlation analysis has allowed establishing a series of empirical relationships between the reservoir parameters (density, effective porosity factor and residual water saturation factor) and, also, determining correlation dependences between porosity coefficients measured in atmospheric and reservoir conditions. There are their comparison characteristics. These relationships can be used in the data interpretation of geophysical studies of wells and in the modeling of porosity and permeability properties of consolidated rocks.***

Keywords: ***siltstones, sandstones, reservoir properties, density, porosity coefficient, permeability coefficient, residual water saturation factor, correlation relationships.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

UDC 553.98(262.81)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.07

Vafa SULEYMANOVA, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-1308-6320
e-mail: vefa_verid@mail.ru
Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan Republic

Samira MANSUROVA, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-1284-4628
e-mail: mansur_s74@mail.ru
Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan Republic

Nazile MAMMADOVA, PhD, teacher
ORCID ID: 0000-0001-6064-6274
e-mail: naza_366@mail.ru
Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan Republic

METHODOLOGY FOR IDENTIFYING OPERATING OBJECTS IN OIL FIELD DEVELOPMENT BASED ON MATHEMATICAL AND STATISTICAL INDICATORS (USING THE EXAMPLE OF THE PIRALLAHI (NORTHERN FOLD) FIELD)

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Background. *In this research, a table based on samples taken from wells in each of the two horizons and using the formation parameter values was compiled. As a result of the researches, five formation parameters (geological and technological) were included in the matrix, and parametric criteria were used to determine the degree of similarity or difference between the upper and lower layers of the KS.*

Methods. *In Pirallahi using the actual data of the wells that opened both layers, (CUS and CLS) calculations were made according to statistical indicators based on the values of the relevant indicators and checked with parametric criteria. Since the calculated prices are lower than the table values and there is a similarity between both objects, it is recommended to combine them and operate them together. Such an approach leads to intensification of development.*

Results. *Due to the examination of complex geological and operational data, the following proposals are recommended along with the consolidation of similar layers in the north of Pirallahi.*

Conclusions. *Thus, since the geological and production indicators between the objects KS_{upper} and KS_{lower} are almost similar, it is advisable to combine them into one object and exploit one grid of wells. The allocation of such objects leads to the intensification of exploitation, and the results can be used in drawing up projects for the development of such layers.*

Keywords: *oil field, horizon, reservoir parameters, mean value, variance, effective thickness, porosity, viscosity, density, reservoir pressure.*

Background

The issue of combining operational objects is constantly studied by researchers, and its results are reflected in the corresponding literature (Bagirov, Narimanov, & Salmanov, 2001). The separation of operational objects should be based on comprehensive research (Bagirov, 1986). As experience shows, the combination of operational objects is of great importance both from the economic and geological point of view. However, it is necessary to justify the corresponding criteria for their allocation and operation as a single object (Bagirov, Mamedov, & Salmanov, 1994). For example, their energy properties, lithological-facial characteristics, physical properties of oil, and natural regimes, which should be close or equal in value, must be taken into account. The solution to the problem can be achieved with the help of geological and mathematical methods, and for a more reliable solution, the method presented by Prof. D. A. Radionov becomes appropriate.

The method of section processing of each productive layer involved in field cutting is favorable from the geological and technological point of view. Thus, each layer has its own network of exploitation and impact wells, which creates conditions for the effective application of appropriate methods in the development process. In this case, it is possible to actively regulate the processing process. However, this option is often not economically viable (Salmanov, & Hasanaliyev, 2000).

If more than two operational objects are separated in the cross-section of an oil and gas field, Bartlett or Cochran criteria are used to determine the degree of difference between them according to any parameter (for example, permeability of reservoir rocks). However, in practice, the comparison of the operating objects separated by any parameter is not based on their complex indicators. In this case, if we denote the number of operating objects by *n*, and the number of their parameters to be compared by *m*, we get an *n*m* matrix. Then the Rodionov criterion was more effective for checking the degree of similarity between the layers in the field section (Rodionov, 1981). According to this criterion, it is possible to come to an unambiguous conclusion about the joint (or separate) processing of the objects located in the cross section of the layer according to the degree of similarity.

Justified allocation of production facilities in the cross-section of multi-layer deposits is the bases of all scientific and practical work on the development of oil and gas fields. At the stage of geological exploration and work on putting deposits into development, all available geological and geophysical information is brought into consideration to divide the section opened by drilling. A comprehensive study of these data and their comparison with those in adjacent areas makes it possible to divide the section into production facilities. This allocation of the section is the basis for subsequent scientific and practical activities of the enterprise (reserve calculation, preparation of a process flow chart and deposit development projects, etc.). It should be noted that any approaches used in dividing the section into horizons and then into production facilities cannot be considered ideal, since the quality and quantity of information used by researchers at the initial stage of putting the field into development is insufficient, and most importantly, such a very important problem of oil field

geology is solved at a qualitative level, without using the appropriate mathematical apparatus. Naturally, under such conditions, the intuition and subjectivity of researchers who put forward the final version of division of a multi-layer oil and gas field come to the fore. Probably, therefore, after putting the field into operation, the scheme for dividing the section into objects is often criticized. However, it should be noted that regardless of how correctly the problem of identifying production facilities in the section of a multi-layer field is solved, it should be periodically updated.

In our opinion, it is most appropriate to use the criterion of D. A. Rodionov, which is an unambiguous and justified procedure for finding homogeneous groups of objects with respect to the parameters of both one-dimensional and multidimensional random variables (Salmanov, 2007). The nature of the procedure for considering partitioning options should be determined by the geological problem being solved. For example, as already noted, the position of observation points can be strictly fixed on one line (division of a stratigraphic section by a set of characteristics). In this case, it is sufficient to consider n–1 options for partitioning the set of observations into two parts. If the hypothesis of homogeneity of observations located on a plane is considered, then the approach to considering the procedure may be different.

The function $\upsilon(r^2)$ is considered, defined on the set of partitions R^2 of the space T into two parts is considered as a criterion for testing the hypothesis of homogeneity:

$$\upsilon(r^2) = \sum_{j=1}^{m} \frac{n_1 n_2 (x_j^{(1)} - x_j^{(2)})^2}{(n_1 + n_2) S_j^2},$$

where $x_J^{(1)}$ and $x_J^{(2)}$ are the arithmetic means of features with number j, calculated for each of the two sets into which n observations is divided; n_1 and n_2 are the numbers of observations in these sets; S_j^2 is the value of the variance of feature with number j, calculated under the assumption that the variances of both groups into which the set is divided are the same. This value is conveniently calculated by the following formula:

$$S_j^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 + 1}\Big(\sum_{t \in A_1} x_{tj}^2 + \sum_{t \in A_2} x_{tj}^2 - \frac{1}{n_1 + n_2}\Big(\sum_{t \in A_1} x_{tj} + \sum_{t \in A_2} x_{tj}\Big)^2\Big),$$

where A_1 and A_2 are the sets into which the space T is divided, and $A_1 \cup A_2 = T$. It is more convenient to calculate the function $\upsilon(r^2)$ using the formula:

$$V(r_0^2) = \frac{n-1}{n(n-k)k} \sum_{j=1}^{m} \frac{\left[(n-k)\sum_{t=1}^{k} x_{tj} - k \sum_{t=k+1}^{n} x_{tj}\right]^2}{\sum_{t=1}^{n} x_{tj}^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{t=1}^{n} x_{tj}\right)^2}$$

If the tested hypothesis is true, then $\upsilon(r^2)$ will be the value of a random variable distributed χ^2 as m with m degrees of freedom. Thus, the hypothesis of homogeneity is accepted if

$$\max_{r \in R} \upsilon(r^2) \le \chi^2_{g,m},$$

and is rejected if

$$\max_{r \in R} \upsilon(r^2) > \chi^2_{g,m}.$$

When there are a large number of oil layers in the field cutting, grouping and joint processing of them significantly reduces the number of wells compared to separate processing of each productive layer and is economically profitable. However, in the grouping option, the final oil production coefficient of the field should be expected to be less than the individual development option of each of them. Since most of the oil fields in our region are multi-layered, it is appropriate to apply the proposed method. Consolidation of operational facilities in the mining division was carried out in several deposits – Neft Dashları, Guneshli, Binagadi, Kirmaku.

Solution of this issue is based on the principle of determining the degree of similarity of layers in the section: geologically similar layers should be exploited together, and different ones should be exploited separately. Solution of the problems of clarifying the division of operational objects at different stages of the development of multi-layered oil and gas fields remains an important problem for all fields. Therefore, it is proposed to apply mathematical methods that provide for the complex use of geological-exploitation indicators of deposits.

Methods

The similarity and differences between layers in the (V) of their characteristics are calculated and verified using Student's and Fisher's criteria, as well as compared with critical values taken from a special table. If the condition of the equation is satisfied, where $\upsilon(r^2) \le \chi^2_{g,m}$, then the objects can be combined since they are compatible. However, if $\upsilon(r^2) > \chi^2_{g,m}$, then it is impractical to combine them since there are differences between the layers. In this case, if the number of exploitation objects is denoted by n and the number of compared parameters by m, a matrix of size $n*m$ is obtained. Based on this criterion, a clear conclusion can be drawn about the joint (or separate) development of objects located in the deposit section, based on the degree of their similarity. The article discusses the question of combining the operating objects of the Kirmakinskaya suite (upper and lower) – KS_{upper} and KS_{lower} – at the Pirallahi field (north fold).

A brief description of the method. Let's accept that in the first stages of working in the field section, the productive layers were combined according to the degree of similarity and turned into n number of exploitation objects. The boundaries that separate them from each other have also been defined. At a certain period of time, the degree of similarity between the processing objects (or the existence of the boundaries separating them) is checked. In this case, it is necessary to solve the problem of determining the boundaries that divide the sedimentary complex into layers of the same type in a certain sequence. A complex of mathematical methods is justified to solve this problem. For this purpose, the indicators that characterize them (for example, the porosity of the reservoir rocks) should be compared with each other. Then the average value (X) and dispersion (S^2) of that indicator are calculated for both layers and the values X_1, X_2 and S_1^2, S_2^2 are obtained for the layers, respectively. Then, based on these values, the Student's and Fisher's tests are used to compare the two layers with each other. By comparing the calculated value of both criteria with their critical value it is possible to make a definite opinion about the significant or slight difference of the layers according to the rock porosity. Fisher's criteria were used in the presented work.

Fisher's criterion: $F = \frac{D_{\max}}{D}$, where $D_{\max}$ – is the maximum variance, D – the variance of the remaining sample.

Student's criterion: $t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{D_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}}$,

where $\bar{x}_1$ and $\bar{x}_2$ – are the average values of the parameter being studied, n – the amount of data, $D_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}$ – the weighted variance, which is calculated using the formula:

$$D_{\bar{x}_1-\bar{x}_2} = \sqrt{\frac{D_1 n_1 + D_2 n_2}{n_1 + n_2 - 2}}.$$

So if the table value F_0 and t_0 is less than the calculated value F_t and t_t, then the null hypothesis is rejected, but if the table values are greater than the calculated ones, then the null hypothesis (H_0) is not rejected. If the results obtained are ambiguous, the results obtained using the Student's criterion are accepted as true.

Results

In the article, the grouping of exploitation objects was considered on the example of the Pirallahi field. The Pirallahi oil field (marine part) is one of the oldest oil fields in Azerbaijan. It is located in the shelf zone of the Caspian Sea, east of the Absheron Peninsula. The island is separated from the Absheron Peninsula by a narrow water basin 4.5 km wide in the north and 1.5 km in the south. In the narrower southern part, in 1940, the sea was artificially drained and a "Dam" was built in the form of a narrow strip, and the island was connected to the Absheron peninsula. Pirallahi Island is 10-12 km long and is considered the largest island in the Absheron Archipelago. The oil field consists of two uplifted structures: northern and southern.

The first exploration works in the field were started by private owners in 1897. In the same year, the Nobel brothers finished drilling several exploratory wells. In 1902, the potential oil content of the KS-3 horizon was discovered in well number 44. Drilling of exploratory wells was continued and as a result, oil accumulations were discovered in PK and KS reservoirs.

The northern uplift has been under construction since 1902. The length of the northern uplift reaches 6 km. The size of the deposit is 8.3x1.8 km. The oil content of the southern uplift in the field was determined in 1930. Industrial objects located in the northern uplift are the KS_{upper}, KS_{lower}, and PK horizons. Over 1000 production wells have been drilled to develop oil reserves at different stages of development.

Despite the fact that the Pirallahi field was included in development since 1903, the clarification of the tectonic structure began after 1931 with the acquisition of new geological mining-geophysical data. The first structural scheme of the deposit was drawn up by geologist A.A. Kamladze. Structural refinement was continued until 1951, with the acquisition of new geological mining-geophysical and development data.

Despite the fact that the Pirallahi deposit was included in the development since 1903, the clarification of the tectonic structure of the structure began after 1931 with the acquisition of new geological mining-geophysical data. The first structural scheme of the deposit was made by geologist A.A. Kamladze.

Changes in the structural maps mainly covered the area where intensive excavation works were carried out on the field. Later, in 1984 and 2000, due to the recalculation of the deposit's reserves, the structural maps were refined taking into account the obtained geological data.

The South Pirallahi structure differs significantly from the anticlinal structures of the Absheron Archipelago. Tectonically, the South Pirallahi structure forms the southern part of the North Pirallahi structure and is characterized by a large-amplitude uplift fault. The plane of the uplift broke the crestal part of South Pirallahi in the direction of the axis line, and as a result, the NE limb (III block) was superimposed on the SW limb (IV block). The amplitude of the fault is 800 m.

The KS formation consists of gray and greyish fine-grained sands. Gray dense or scattered layers of sandstone are often found in the section, and the sandiness of the layer increases as it goes down. In the electric log diagram, sandy layers are observed in the section, and the value of the assumed specific resistivity curve is more than 2550 Ohm m. In this regard, the KS formation is divided into 7 operational objects: I, II, III, IV, IVa, V, Va, and recently it is divided into 2 objects. The KS_{upper} horizon includes groups I, II, and III, and the KS_{lower} includes groups IV, IVa, V, and Va. The thickness of the KS formation varies in a small range from 240 to 280 m (Fig. 1). Thus, the thickness of the layer increases gradually from the crest to the edges of the fold. The sandiness of the horizon varies in the range of 20–40 %.

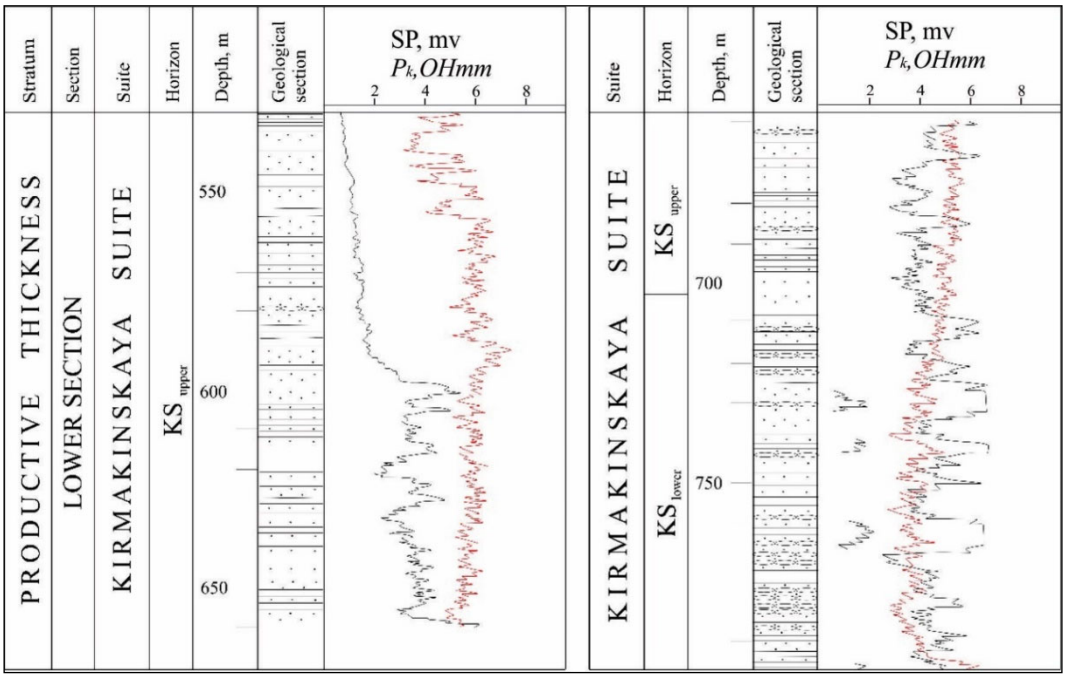


Fig. 1. Section of the KS horizon of the Pirallahi field

Waterflooding in Pirallahi field. In order to maintain formation pressure in the field, the contour waterflooding process was started in 1947 in the southern uplift of the field. From 1947 to 1949, the waterflooding of the formations covered a distance of 200–250 m from the wells. Since 1949, the waterflooding process has been expanded by injecting sea water into the eastern part of the northern fold with new wells. The analysis of the initial and current production of the wells shows that the effectiveness of the waterflooding process in the northern fold was not high.

In 1948, water was pumped from two injection wells (600–800 m deep) in the western zone of the dry area, and in 1950–1951 from 6 more injection wells to study the effect on operational wells located at a distance of 150–200 m. Due to the flow of sand into the wells and the ingress of formation water, the waterflooding process was stopped in 1986, and since 2012, the waterflooding process has been started again in the SW KS_{upper} horizon of the northern fold. During the waterflooding, 19828.8 thousand m^3 of water was pumped into the bed.

The northern uplift. Since 1947, the process of waterflooding was started in the uplift, in 1986, this process was stopped, and since 2012, the process of waterflooding has been started again. In the northern uplift, the process of linear waterflooding on the field was started in 1951. Currently, 12 injection wells are in the inactive fund in the northern fold. From the beginning of the process until now, 14384.2 thousand m^3 of water has been pumped into the uplift.

The southern uplift. Since 1952, the waterflooding process was started in the uplift, in 1984, the efficiency of waterflooding decreased and as a result, this process was stopped. From the beginning of the process until now, 5447 thousand m^3 of water has been pumped into the uplift zone.

Physico-chemical properties of oil. In the Pirallahi field, oil samples were analyzed in order to study the physical and chemical properties of oil in reservoir conditions. As a result of the conducted research, density, viscosity, volume coefficient, gas solubility in oil, etc. parameters are set.

The formation oil parameter on KS_{upper} was studied based on 72 samples. As it can be seen, the average value of gas capacity of oil is 18 m^3/t, density is 0.899 g/cm^3, viscosity is 24 mPa.s.

Production dynamics of the deposit. As can be seen from the dynamics, the Pirallahi field was in the I stage of development until 1949. Thus, performance indicators increased dynamically. In 1949–1953, the indicators remained stable at the highest point. In the subsequent period, the production indicators began to decrease gradually. Currently, the field is in the final IV stage. In recent years, due to the new wells drilled in the onshore and offshore part of the field, the indicators have started to rise relatively (Fig. 2). In 2021, 4 wells were drilled and put into operation. In particular, 18 wells were drilled from core samples No. 1140, 16; No. 1150, and 16 wells from core sample No. 1220 built in the shallow water part of the dam. In addition, restoration works are being carried out for the wells that were flooded due to the rise of the sea level. Since 2013, 25 wells have been decommissioned and returned to the operating fund.

At present, the construction of earth foundations in the shallow part of the sea is being continued. Construction of 16-well land foundation No. 1240 continues.

Research works on the application of influence methods are being conducted. The vibroresonance method was used in wells No. 1024 and 1025. In wells No. 1072 and 1080, special reagents were used to increase the temperature at the bottom of the well.

Based on the results of the analysis of 42 samples taken from KS_{lower}, the average value of gas capacity is 46 m^3/t, density is 0.890 g/cm^3, and viscosity is 16 mPa.s.

The objects of the Kirmakinskaya suite that were studied were developed simultaneously. They operate in the dissolved gas mode and are in the final stage of development. The last time oil reserves were estimated at the field was in 2018. The reserves of each of the two objects were estimated separately, and the average values of the geological and production data of the horizons are presented in Tab. 1.

As can be seen from Tab. 1, the average values of many parameters (effective thickness, porosity, viscosity, density, temperature, reservoir pressure, etc.) and the daily well productivity are very close to each other (in the range of 0.5–0.7 tons per day). Both objects operate in the dissolved gas mode, as already noted earlier.

In this study, based on samples taken from wells of each of the two horizons and using the values of reservoir parameters, a table (Tab. 2) was compiled. As a result of the research, five reservoir parameters (geological and technological): oil viscosity, density, rock permeability, current reservoir pressure, reservoir temperature, reservoir water type were included in the matrix using parametric criteria to determine the degree of similarity and the difference between the upper and lower KS horizons.

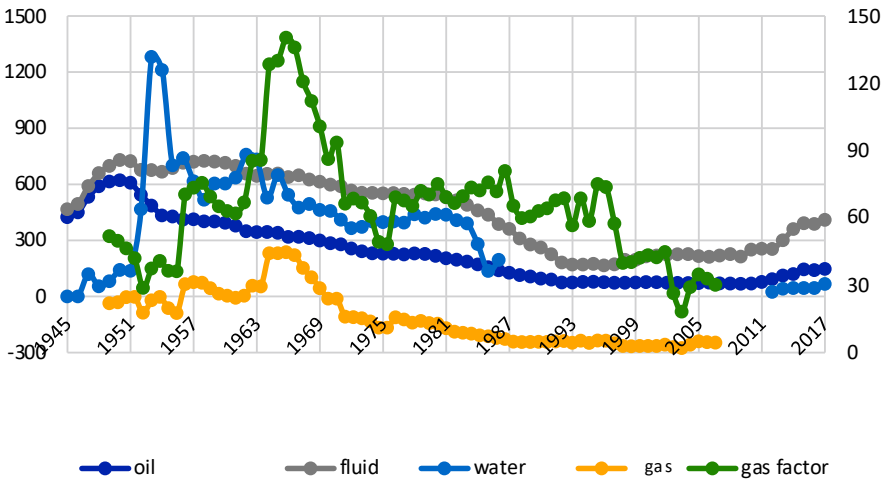


Fig. 2. Dynamics of development indicators of the Pirallahi field

Table 1

Geological and production indicators of the horizons of the Pirallahi field

Indicators	Horizons	
	KS_{upper}	KS_{lower}
Year of commissioning	1902	1902
Reservoir depth, m	270	420
Oil-bearing area, ha	818	114
Effective reservoir thickness, m	12,8	11,5
Rock porosity coefficient, %	24	26
Rock permeability, mkm^2	0,075	0,123
Oil saturation coefficient of the reservoir	0,74	0,68
Density of reservoir oil, kg/m^3	899	890
Oil viscosity under reservoir conditions, mPa.s	24	16
Type of reservoir water	Sodium bicarbonate	Sodium bicarbonate
Mineralization of reservoir water, g/L	33,2	49,8
Reservoir temperature, °C	21,5	23,1
Reservoir pressure, MPa	17,2	18,8
Reservoir water cut, %	68,7	74,5
Current well density, ha/well	3,8	1,2
Well fund	95	57
Oil recovery factor: ultimate current	0,310 0,270	0,340 0,310
Daily production rate: oil, t/day water, m^3/day	0,5 1,2	0,7 2,2

Table 2

Well data for the KS_{upper} and KS_{lower} horizons

Well	Horizons	Blok	Oil viscosity, mPa	Oil density, g/sm^3	Rock permeability, $0.001mkm^2$	Current reservoir pressure, MPa	Reservoir temperature, °C	Type of reservoir water
411	KS_{upper}	I	35	0,916	69	15	23	S_1A_2-Sodium bicarbonate
849	KS_{upper}	I	33	0,913	78	13	21	S_1A_2-Sodium bicarbonate
1168	KS_{upper}	II	39	0,914	64	12	19	S_1A_2-Sodium bicarbonate
946	KS_{upper}	II	40	0,910	75	11	18	S_1A_2-Sodium bicarbonate
1080	KS_{lower}	I	43	0,922	117	19	24	S_1A_2-Sodium bicarbonate
295	KS_{lower}	I	39	0,920	132	17	25	S_1A_2-Sodium bicarbonate
431	KS_{lower}	II	41	0,914	127	22	22	S_1A_2-Sodium bicarbonate
438	KS_{lower}	II	40	0,911	110	25	21,4	S_1A_2-Sodium bicarbonate

Conclusions

The analysis of the obtained results shows that the layer parameters of both horizons do not differ significantly from each other according to their average values (Tab. 3).

The calculation results were as follows: with a critical value of the Student's criterion of 3.18 and Fisher's criterion of 15.98, the calculated values were lower than the tabular values: $T_{calc.} < T_{tab.}$ and $F_{calc.} < F_{tab.}$ This situation once again confirms the similarity between these parameters.

Table 3

Distribution of reservoir parameters by wells and statistical indicators

Parameters	Horizon	Statistical indicators				Parametric criteria, α=0,05			
		Average value $\overline{X}$	Dispersion (D)	Mean square bias (σ)	Coefficient of variation (V,%)	Calculated value (T_{calc})	Table value (T_{tab})	Calculated value (F_{calc})	Table value (F_{tab})
Oil viscosity, mPa	KS_{upper}	37	6.5	2.5	6.75	1.4	3.18	2.6	15.98
	KS_{lower}	41	2.5	1.5	3.65				
Rock permeability, 0.001 mkm^2	KS_{upper}	71	32.5	5.7	8.02	1.5	3.18	2.4	15.98
	KS_{lower}	121	78.5	8.86	7.32				
Oil density, g/sm^3	KS_{upper}	913	3.5	1.8	0.19	0.29	3.18	6.4	15.98
	KS_{lower}	917	22.5	4.7	0.51				
Current reservoir pressure, MPa	KS_{upper}	13	2.5	1.5	11.53	2.24	3.18	3	15.98
	KS_{lower}	21	7.5	2.7	12.8				
Reservoir temperature, °C	KS_{upper}	20	5	2.2	11	1.12	3.18	1.5	15.98
	KS_{lower}	22	7.5	2.7	12				

Thus, since the geological and production indicators between the KC_{upper} and KC_{lower} objects are practically identical, it is expedient to combine them into one object and operate them with a single well grid. The identification of such objects leads to the intensification of production (Bagirov, Gismetov, & Aliye, 1989), and the results can be used in the development of projects for oil reservoirs (Velieva, 2005).

Authors' contribution: Vafa Suleymanova – setting of the problem, conducting of mathematical-statistical analysis, analysis of results; Samira Mansurova – data collection and processing, mathematical-statistical analysis; Nazile Mammadova – drafting of the article.

References

Bagirov, B. A., Narimanov, A. A., & Salmanov, A. M. (2001). *Methods of separation of operational objects in the cutting of multi-layered oil fields*. ASOA Publishing House [in Azerbaijan]. [Bağırov, B. A., Nərimanov, A. A., & Salmanov, A. M. (2001). Çoxlaylı neft mədənlərinin kəsilməsində istismar obyektlərinin ayrılması üsulları. ADNA nəşriyyatı].

Bagirov, B. A. (1986). *Geological basis for the development of oil deposits*. Elm [in Azerbaijan]. [Bağırov, B. A. (1986). Neft yataqlarının əlavə işlənməsi üçün geoloji əsaslar. Elm].

Bagirov, B. A., Gismetov, T. V., & Aliyev, R. M. (1989). Identification of local zones by the area of deposits for the application of thermal methods of reservoir stimulation. *Azerbaijan Oil Industry*, 2, 8–16 [in Azerbaijan]. [Bağırov, B. A., Xismətov, T. V., & Əliyev, R. M. (1989). Formalara təsir edən istilik üsullarının tətbiqi məqsədilə yataqların ərazisi üzrə yerli zonaların müəyyən edilməsi. *Azərbaycan neft sənayesi*, 2, 16–18].

Bagirov, B. A., Bagirov, E. B., & Salmanov, A. M. (1992). Classification of oil deposits of Azerbaijan with hard-to-recover reserves to determine the order of their development. *Proceedings of the IX International Symposium Non-traditional sources of hydrocarbon raw materials and problems of their development, Petersburg,* p. 119–120 [in Russian]. [Багиров, Б. А., Багиров, Е. Б., & Салманов, А. М. (1992). Классификация нефтяных залежей Азербайджана с трудноизвлекаемыми запасами для определения очередности их освоения. *Материалы IX Международного симпозиума Нетрадиционные источники углеводородного сырья и проблемы его освоения, Петербург*, с. 119–120].

Bagirov, B. A., Mamedov, T. M., & Salmanov, A. M. (1994). Geological basis for the choice of oil deposits in Azerbaijan for development by horizontal wells. *Azerbaijan Oil Industry*, 6, 33-36 [in Azerbaijan]. [Bağırov, B. A., Məmmədov, T. M., & Salmanov, A. M. (1994). Azərbaycan yataqlarında horizontal quyularla işlənmək üçün neft yataqlarının seçilməsinin geoloji əsasları. *Azərbaycan neft sənayesi*, 6, 33–36].

Bagirov, B. A., Salmanov, A. M., & Hasanaliyev, M. G. (1998). On determining the quality of oil reserves. *Oil and Gas Geology*, 1, 22–25 [in Russian]. [Багиров, Б. А., Салманов, А. М., & Гасаналиев, М. Г. (1998). Об определении качества запасов нефти. *Геология нефти и газа,* 1, 22–25].

Velieva, E. B. (2005). On the classification of hydrocarbon reserves and resources. *Azerbaijan Oil Industry*, 5, 5–13 [in Azerbaijan]. [Vəliyeva, E. B. (2005). Karbohidrogen ehtiyatlarının və ehtiyatlarının təsnifatı məsələsinə dair. *Azərbaycan neft sənayesi,* 5, 5–13].

Narimanov, A. A., Gasymov, A. A., & Akperov, N. A. (1996). Features of the development of offshore oil and gas fields. *Azerbaijan Oil Industry,* 1–2, 6–11 [in Azerbaijan]. [Nərimanov, A. A., Qasımov, A. A., & Əkbərov, N. A. (1996). Dənizdə neft və qaz yataqlarının işlənməsinin xüsusiyyətləri. *Azərbaycan neft sənayesi,* 1–2, 6–11].

Rodionov, D. A. (1981). Statistical solutions in geology. Nedra [in Russian]. [Родионов, Д. А. (1981). Статистические решения в геологии. Недра].

Salmanov, A. M. (2004). On the problem of developing Azerbaijani deposits with horizontal wells. *Oil and Gas Geology,* 6, 41–43 [in Russian]. [Салманов, А. М. (2004). О проблеме доразработки месторождений Азербайджана горизонтальными скважинами. *Геология нефти и газа,* 6, 41–43].

Salmanov, A. M. (2007). Geological and mathematical aspects of a new approach to identifying operational objects in multilayer fields. *Azerbaijan Oil Industry,* 3, 23–26 [in Azerbaijan]. [Salmanov, A. M. (2007). Çoxlaylı yataqlarda istehsal müəssisələrinin müəyyənləşdirilməsinə yeni yanaşmanın geoloji-riyazi aspektləri. *Azərbaycan neft sənayesi*, 3, 23–26].

Salmanov, A. M. (2005). Geological and production aspects of drilling and operation of horizontal wells in onshore fields of Azerbaijan. *Proceedings of ANAS. Earth Sciences Series*, 3, 64–70 [in Azerbaijan]. [Salmanov, A. M. (2005). Azərbaycanın quru yataqlarında horizontal quyuların qazılması və istismarının geoloji və çöl aspektləri. *Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri. Yer Elmləri Seriyası*, 3, 64–70].

Salmanov, A. M., Hasanaliyev, M. G. (2000). Identification of Azerbaijan's deposits with hard-to-recover oil reserves and recommendations for their rational development. *Scientific conference dedicated to the 80th anniversary of ASOA,* p. 16–17 [in Azerbaijan]. [Salmanov, A. M., Həsənəliyev, M. Q. (2000). Çətin çıxarılan neft ehtiyatlarına malik Azərbaycan yataqlarının müəyyən edilməsi və onların səmərəli işlənməsi üçün tövsiyələr. *AMEA-nın 80 illik yubileyinə həsr olunmuş elmi konfrans*, c. 16–17].

Отримано редакцією журналу / Received: 16.06.24
Прорецензовано / Revised: 11.09.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Вафа СУЛЕЙМАНОВА, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-1308-6320
e-mail: (vefa_verid@mail.ru)
Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджанська Республіка

Саміра МАНСУРОВА, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-1284-4628
e-mail: (mansur_s74@mail.ru)
Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджанська Республіка

Назіле МАММАДОВА, канд. екон. наук, викладач
ORCID ID: 0000-0001-6064-6274
e-mail: (naza_366@mail.ru)
Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджанська Республіка

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ДІЮЧИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ РОЗРОБЦІ НАФТОВОГО РОДОВИЩА ЗА МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ (НА ПРИКЛАДІ РОДОВИЩА ПІРАЛЛАХІ (ПІВНІЧНА СКЛАДКА))

Вступ. ***У цьому дослідженні було складено таблицю на основі проб, відібраних зі свердловин кожного з двох горизонтів і з використанням значень параметрів пласта. В результаті досліджень до матриці було включено п'ять параметрів пласта (геологічних і технологічних), а за параметричними критеріями визначено ступінь подібності або відмінності між верхнім і нижнім шарами КС.***

Методи. ***На родовищі Піраллахі з використанням фактичних даних свердловин, які розкрили обидва пласти, (CUS і CLS) було зроблено розрахунки за статистичними показниками на основі значень відповідних показників і перевірено параметричними критеріями. Оскільки розраховані ціни нижчі за табличні та є схожість між обома об'єктами, рекомендовано об'єднати їх та експлуатувати разом. Такий підхід приводить до інтенсифікації розвитку.***

Результати. ***Завдяки вивченню складних геологічних та експлуатаційних даних, наступні пропозиції рекомендуються разом із консолідацією подібних шарів на півночі Піраллахі.***

Висновки. ***Таким чином, оскільки геолого-видобувні показники між об'єктами KS_{upper} і KS_{lower} практично схожі, їх доцільно об'єднати в один об'єкт і експлуатувати одну сітку свердловин. Виділення таких об'єктів приводить до інтенсифікації експлуатації, а результати можуть бути використані при складанні проєктів розробки таких пластів.***

Ключові слова: ***нафтове родовище, горизонт, параметри пласта, середнє значення, дисперсія, ефективна товщина, пористість, в'язкість, щільність, пластовий тиск.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 551.24:3
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.08

Liubov OSMACHKO, DSc (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0003-1248-261X
e-mail: osml@ukr.net
State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Valentin VERKHOVTSEV, DSc (Geol.)
ORCID ID: 0000-0002-1015-6725
e-mail: verkhovtsev@ukr.ne
State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

STRUCTURIZATION OF TECHNOLOGICALLY CHANGED VOLUMES OF THE "PIVDENNYI" QUARRY OF C. KRYVYI RIH

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

Background. *The research took place within the "Pivdennyi" iron ore quarry in Kryvyi Rih c. with the aim of comprehensive and effective further use of the technogenically transformed areas of the subsoil and the earth's surface of Kryvbas. A brief overview of the achievements of previous researchers is given.*

Methods. *Generally accepted research methods are applied. The fixation of bedding elements in relatively undisturbed, small-sized blocks (hereinafter – "blocks" or "surviving block") of quartzites and shales of the Saksagan suite and in blocks of demarcation of surviving block – technogenic accumulations was carried out. In relatively undisturbed blocks of quartzite, such elements for banding, schistosity, linearity of mineral aggregates, axes of folded forms, striation, furrows, etc. were measured. The actual material regarding the placement of structural elements was processed using the StereoNett 2.46 program, and the displacement calculations of the blocks of the studied formations were also made.*

Results. *Among technogenic accumulations (scree slope, embankments and filled artificial cavities), according to the degree of structuring, unstructured and structured to varying degrees were observed. Layering, mechanical schistosity and linearity are fixed within them.*

It was found that the formation of the system of blocks of the "Pivdennyi" quarry took place during their rotation along both the vertical and horizontal axes.

Conclusions. *The emergence of newly formed planes of technogenic accumulations took place with the inheritance of the structural anisotropy existing in the surviving block with the creation of its own stratification. Therefore, the investigated system "surviving block – technogenic accumulations" developed and formed as a complete object, mutually coordinated, years – decades in surface conditions.*

The transformation of technogenic accumulations, their "completion"/structuring, as a result of which the integrity of disturbed and missing areas of the geological volume is restored, are constructive phenomena. They are practically a natural laboratory of processes of formation of structural and textural elements in loose accumulations. Their tracking in time would make it possible to actually observe the processes of self-creation/reproduction of modern technogenic-natural objects.

The ranking of structural neo formations in technogenic accumulations can be used as one of the criteria for assessment the assimilation potential of these accumulations and their suitability for economic reclaim.

Keywords: *ferruginous horizons, "Pivdennyi" quarry, undisturbed blocks, technogenic accumulations, bedding elements, structuring.*

Background

The research was carried out on the territory of the Saksagan district of Kryvyi Rih, where iron horizons of the Saksagan suite of the Kryvyi Rih series were discovered within the "Pivdennyi" iron ore quarry. The studies were carried out in connection with the ***problem*** of the lack of systematic monitoring information about the trends in the development of geodynamic processes and changes that occur within the technologically transformed areas of the subsoil and the earth's surface of Kryvbas. Therefore, the research of such areas is relevant and carried out with the ***aim*** of their comprehensive and effective use and prevention of the development of negative natural and technogenic processes (Geological investigation..., 2023).

According to archaeological research, the use of iron by mankind in the Dnieper region has been known since the middle of the 2nd millennium BC. (Nikitenko, 2023).

From the end of the 18th century, active economic development of the south of Right Bank Ukraine began. Under the leadership of V.F. Zuyev, iron ores in Kryvbas were discovered during one of his expeditions. Thanks to the work and perseverance of O.M. Pol', in 1876 the industrial development of Kryvyi Rih iron ores began. This became the starting point in the anthropogenic transformation of Kryvbas (Denisik, & Zadorozhnya, 2013).

At the end of the 19th century and at the beginning of the 20th century, ore deposits were mined to a depth of 25–50 m using an open method. As the depth of mining operations increased, ore deposits were mined in shallow (50–100 m) mines. The cavities formed as a result remained or were filled with loose overburden, mainly clays and loams (Geological investigation..., 2023).

The "Pivdennyi" quarry was put into operation in 1972, in 2001 it was transferred to the mine management for underground ore mining of KDGMK "Kryvorizhstal". The iron ore deposit was discovered to a depth of 1,100 m (Extraction..., 2018). Currently, the "Pivdennyi" quarry is being developed by "RUDOMAIN" LLC. Achieved dimensions of the quarry: length – 1050 m, width – 630 m, depth – 140 m; the quarry is extended submeridionally (Fig. 1).

The fourth, fifth and sixth iron and shale horizons of the Saksagan suite of the eastern limb of the Saksagan syncline are spread directly within the territory of the development of the "Pivdennyi" quarry. On the western side of the quarry, in its upper part, the upper tectonic scale, or part of the Saksagan anticline, is partially exposed, which is represented

within the quarry by rocks from the talc horizon to the fourth shale horizon (Geological investigation..., 2023).

The Saksagan syncline is characterized by a strike azimuth of 0–30°, a dip of the axial surface to the west at an angle of 45–70°, and a plunge of the hinge to the north at an angle of 0 to 20° (Extraction..., 2018; Geological investigation..., 2023).

According to the results of the geological-surveying of "RUDOMAIN" LLC, it was established that the section of the "Southern" quarry in its current form was formed due to technogenic factors caused by the underground method of working out rich iron ores, which led to the collapse of overlying rocks and their mixing with iron martites ores and ferruginous quartzites, to the processes of subsidence and slumping of the host rocks. As a conclusion, it was ascertained that the "Pivdennyi" quarry site belongs to the technogenic genetic type of deposits (Geological and..., 2018; Protocol..., 2018).

Fig. 1. General view of the "Pivdennyi" quarry in the direction from south to north

In 2021, a ground-penetrating radar survey was carried out on the site of the "Pivdennyi" quarry, its western flank and the surrounding area with the help of the low-frequency ground-penetrating radar complex "Loza-2N". A total of 23 profiles were made, the total length of which is 15,404 m. According to the results of the work, 140 anomalies were identified, which were summarized into four groups: anomalies, which are vertical collapse zones that were filled with clay or soil; local anomalies such as voids; anomalies that form large conical structures and are filled with a mass of collapsed rocks or filled with rock from dumps, or clay or soil; structural anomalies reflecting the geological structure or individual structural elements, for example, folds, faults, etc.

Most of the detected anomalies, which can be interpreted as collapsed and landslide rocks, are located on the western side of the quarry. Also, the bottom of the pit has signs of numerous collapse processes and backfilling. The eastern side of the quarry is less involved in these processes (Geological investigation..., 2023).

It is extremely difficult to estimate the volumes of technogenic subsidence and collapses as a result of underground mining within the "Pivdennyi" quarry, but it can be argued that they significantly exceed the volumes of the rock mass mined underground (Geological investigation..., 2023).

As a result, the quarry can be represented as a technogenic-geological formation, where relatively undisturbed blocks of crystalline rocks (surviving block) and blocks of technogenic accumulations alternate. The apparent thickness of both types of blocks ranges from a few meters to the first tens of meters.

The totality of the action of human industrial activity and natural processes generate processes that are layered on the created mining complex. This is a special group of processes and phenomena that G.I. Denisik and G.M. Zadorozhnya are proposed to be called derivatives (Denisik, & Zadorozhnya, 2013). These researchers typify derivative processes and phenomena observed within the mining landscapes of Kryvyi Rih according to a number of signs: by genesis, speed, area, sequence of activation, age, relation to the earth's surface, nature of manifestation and degree of regulation (Denisik, & Zadorozhnya, 2013).

Research conducted in Kryvbas by V.P. Voloshchenko, G.M. Malakhov, I.D. Rivkin and a whole galaxy of their followers were allowed to have a fairly clear idea of the geomechanical processes occurring in the upper part of the earth's crust as a result of the underground development of iron ore deposits. Very briefly, the essence of the phenomenon can be reduced to the following (Extraction..., 2018; Geological investigation..., 2023): a) the collapse of the ceiling of the void causes the advance of overlying rocks starting from the surface along the lying side. As a result, sedimentary rocks from the surface fall into the depth; b) the void is also filled with the rocks of the hanging side; c) on the surface there is a trough of deflection, with zones of collapse and landslide. The landslide zone develops at an angle from 80° to 42° (Extraction..., 2018; Geological and..., 2018; Geological investigation..., 2023).

As it was shown above, the shape of bodies of technogenic accumulations, methods and conditions of their

formation were mainly studied. The internal structure of technogenic formations remained outside the attention of researchers. The above is ***part of a general problem*** that has not been solved before, which this work is devoted to.

Methods

The authors within the framework of the "Pivdennyi" quarry used generally accepted methods of research – expeditionary, natural sites, cartographic, aerospace, observation, analysis. In this article, we present the results of the work, which consisted in measuring with a compass the bedding elements of the horizons of quartzites and slates of the Saksagan suite, both relatively undisturbed and to varying degrees technogenically altered. In particular, the azimuths and angles of dip of planar structural elements – banding, schistosity, and the azimuths and pitch angles of linear elements – were measured within the boundaries of individual relatively undisturbed blocks of quartzites and slates (surviving block). Banding is usually represented by alternating bands of quartzite, differing in color, mineral composition and sizes of mineral grains. Schistosity is expressed by uniformly oriented and scaly minerals and their aggregates close together. Linear structural elements are represented by hinges of folded forms, elongated mineral aggregates, striation, furrows (Fig. 2).

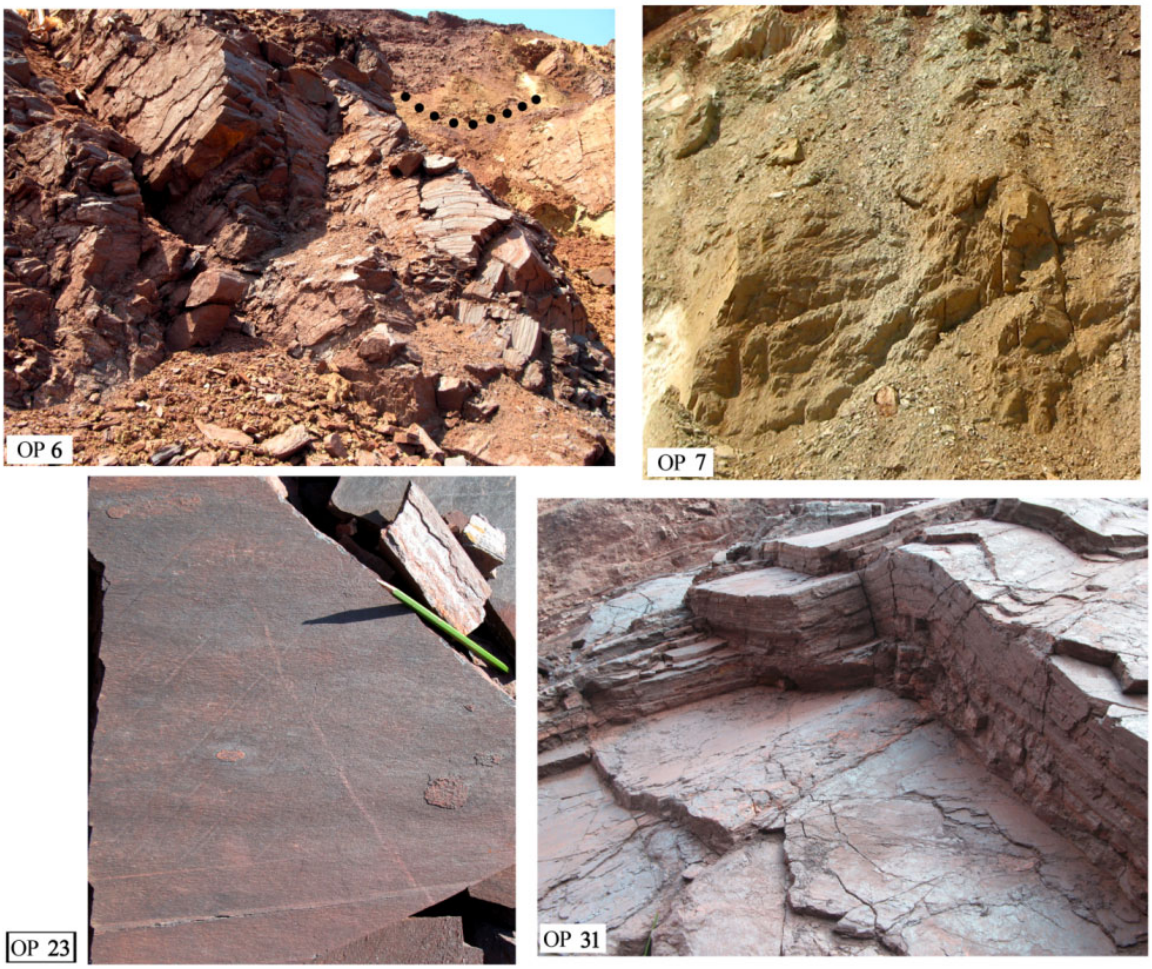


Fig. 2. Photo of structural elements – planes of banding, schistosity and folded forms of separates surviving block of quartzite and shale of the "Pivdennyi" quarry.

OP – observation point. OP 6, 7 – the western side, OP 23, 31 – eastern side of the quarry. Within OP 6, the exit of the structuring planes in the scree slope is emphasized by the dot-dashed line. OP 23 – several linearities in the banding plane of ferruginous quartzites by furrows, elongated mineral aggregates and striation. OP 31 – folded form in ferruginous quartzites

Among technogenic formations (scree slope, embankments and filled artificial cavities), according to the degree of structuring, we observed at least two varieties – unstructured and structured to varying degrees. Within the limits of the first of the mentioned types of technogenic formations, no signs of structural and textural regularity were found. Within the structured technogenic formations, signs of structural and textural arrangement are recorded. They are expressed by layering, schistosity and linearity, the bedding elements of which were recorded. The layering of technogenic accumulations is represented by the alternation of layers, which differ among themselves in terms of color and size of rock fragments. Such planes are emphasized by schistosity, which is expressed by uniformly oriented, flat mineral aggregates and fragments of crystalline rocks in layering planes (Fig. 3). Only one linear structural element within technogenic formations has been recorded in the form of a hinge of the heap fold. The azimuths and dip angles of the planes of separation between the surviving blocks and slumps, scree slopes, filled cavities and other technogenic accumulations were also measured.

Accordingly (Korzhnev et al., 2005; Denisik, & Zadorozhnya, 2013), the functioning of processes and phenomena in mining landscapes (and hence the degree and speed of structuring of technogenic accumulations) depend on the intensity of mining operations in quarries,

which create peculiar conditions/microclimate. These are the following conditions: initiation of additional technogenic vibration, migration and redistribution of matter, increase in fracturing and water permeability, change in thermal regime and conditions (Eh–pH).

The technogenic layering was most likely formed as a result of successive pouring of crushed rock during the creation of man-made and non-man-made accumulations of fragments of crystalline rocks and, subsequently, gravitational compaction, granulation differentiation of such accumulations and the action of the man-made factors listed above. Schistosity is created due to the rotation and reorientation of individual flakes and packages of mineral flakes as well as fragments of crystalline rocks under shear conditions. The mechanisms of formation of layering and schistosity in natural conditions are substantiated in the works of O.I. Lukienko with co-authors (Lukienko, Vakarchuk, & Kravchenko, 2014; Lukienko, Yanchenko, & Kravchenko, 2018). In particular, in the conditions of the diagenetic subzone of the primary epizone, the optimal architecture of the accumulation environment is formed, which is in balance with the tectonic and P-T conditions at the time of the formation of layering and mechanical schistosity formation. The paper (Lukienko, Vakarchuk, & Kravchenko, 2014; Lukienko, Yanchenko, & Kravchenko,, 2018) also provides data on the creation of artificial electromagnetic fields, which initiate, in addition to the creation of banding and schistosity in rocks in the solid state, and the migration of matter with the formation of new minerals (hematite, magnetite, etc.). Formations similar to the above-mentioned heap fold, under natural conditions, are completed because of the bordering of relief irregularities and the subsequent compaction of the heap mass.

All the above-mentioned measurements are presented in the tables (Tab. 1-4). In addition to the actual measurements, Tab. 1 and 2 show the calculations of the displacements of each of the following blocks relative to each of the previous ones and relative to the average statistical azimuths and dip angles for the sides of the quarry along the vertical and horizontal axes. At the end of the tables, the averaged values of the azimuths and dip angles and displacements for the examined surviving block, in general, of the corresponding sides of the pit are shown. Therefore, the averaged values calculated reflect the general situation for the parts of the sides of the quarry which formed surviving blocks. Similar calculations were made for technogenic accumulations (table 3).

All the given data on the bedding elements of the investigated structures of the western and eastern sides and the relative displacements of their components of the "Pivdennyi" quarry are given in the summary Tab. 4, also in Fig. 4.

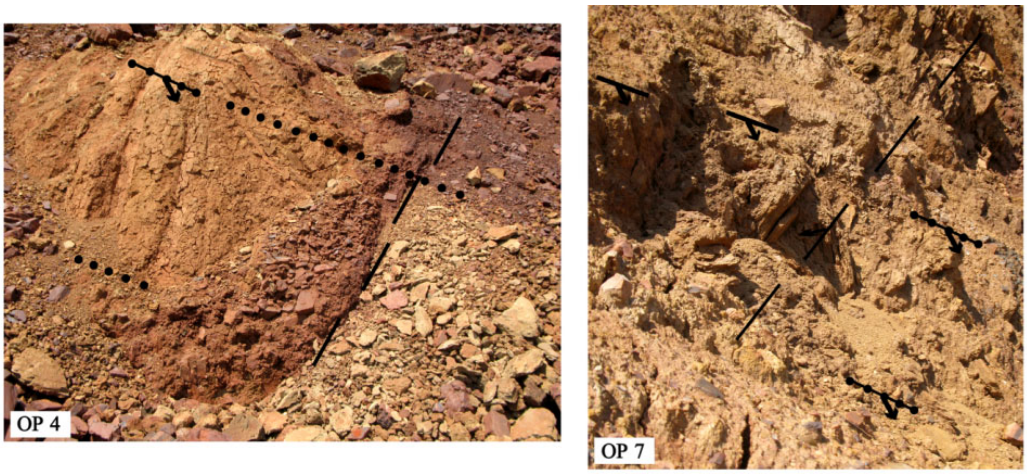


Fig. 3. Photo of structural elements of individual scree slopes and technogenic embankments on the western side of the "Pivdennyi" quarry.
OP 4 – demarcation of scree of different degrees of structuring in the form of a layering/sliding zone, with a dotted line underlined. To the left of the border is a higher degree, a dot-dashed line with an arrow is the exit and direction of dip of the layering planes.
OP 7 – delineation of the surviving block (on the left) and scree in the form of a friction zone, highlighted by a dotted line. Line with an arrow – bedding elements. For other designations, see above

Results

The dip azimuths of banding of quartzites on the eastern side of the "Pivdenniy" quarry vary from 270 to 320°. Dip angles within 10–47°. The average dip azimuth (on 16 measurements) of the banding of quartzites on the eastern side of the quarry is 293.3°, the average dip angle (on 16 measurements) of the banding of quartzites on the side is 31.9°. The average displacement of the blocks (surviving block) within the board, both along the vertical axis and horizontally, is insignificant – a few degrees. But we can talk about the absolute displacement of the surviving blocks of quarry only if we know the bedding elements of rock before the start of iron ore development.

The dip azimuths of banding of quartzites on the western side of the "Pivdennyi" quarry vary quite widely – from 240° to 20°. Also, the dip angles are from 25 to 87°. The average dip azimuth (on 49 measurements) of quartzite banding on the western side of the quarry is 333°, the average dip angle (on 49 measurements) of quartzite banding is 48.8°. The average displacement of the blocks, both along the vertical axis and horizontally, is an order of magnitude higher compared to those on the eastern side (Tab. 4, Fig. 4).

Newly formed textures were found in 70 % of technogenic geological bodies (scree, embankments, etc.) of the "Pivdennyi" quarry, where iron horizons of the Saksagan suite are being re-developed. These are layering and schistosity, which are formed due to successive filling/deposition, and most likely gravitational compaction and granulation differentiation of crushed rock mass during mining, as well as rotation and reorientation of flat mineral aggregates and rock fragments. The bedding elements of such newly formed textures of technogenic bodies in 40 % of the cases imitate the bedding elements of bedrock rocks in surviving blocks. Namely, the dip azimuths of technogenic newly formed textures of the "Pivdennyi" quarry vary between 230 and 88°. Dip angles from 22 to 90°.

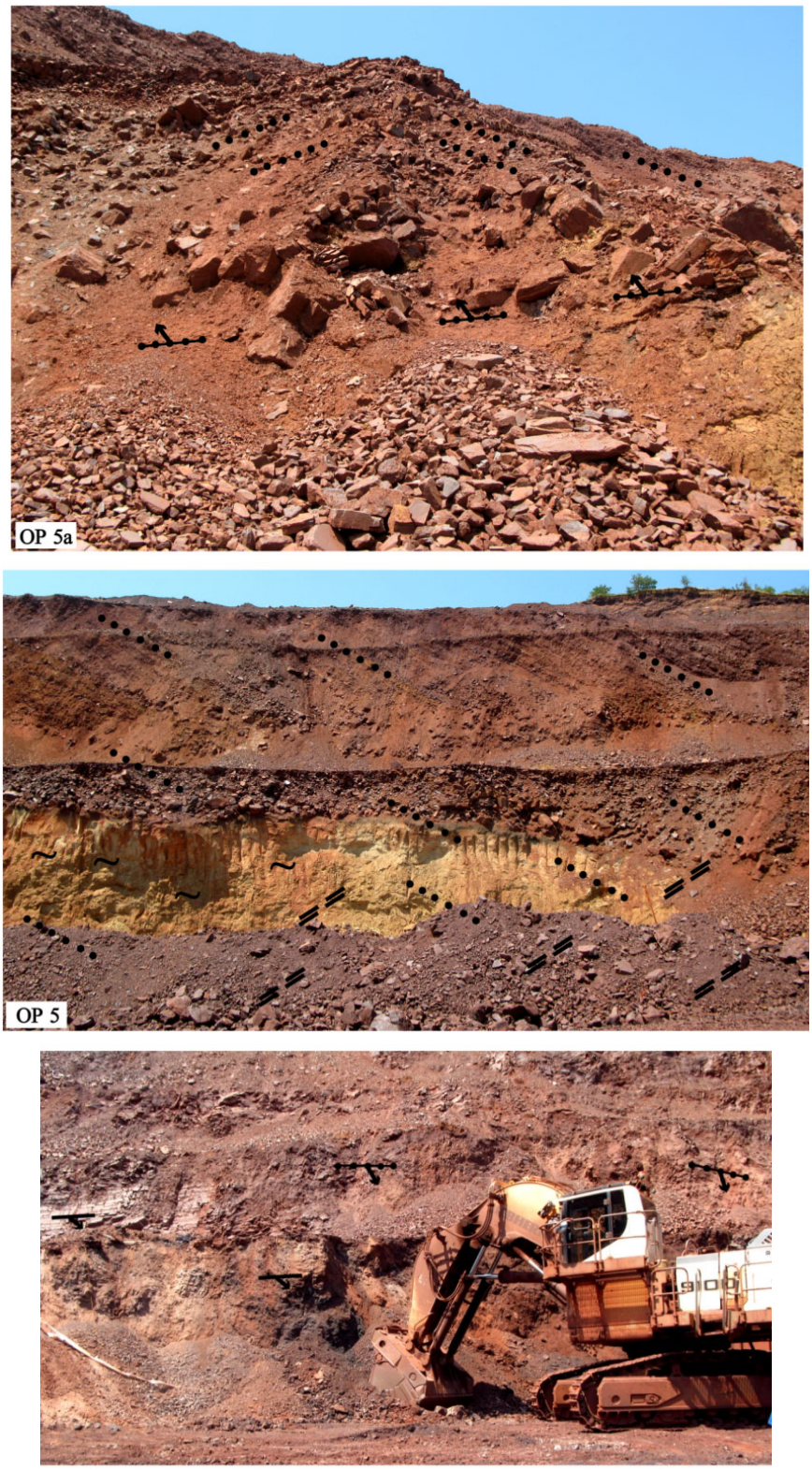


Fig. 4. continuations.
OP 5a – heap fold cloak, the exits of the sides planes are highlighted with a dot-dashed line; the dot-dashed line with arrows (dep direction) is the output of the layering planes of technogenic accumulations; below the photo – cone-shaped unstructured landslide bodies.
OP 5 – heap layering (above), the exits of its planes are highlighted with a dot-dashed dotted line. These planes are through the entire stratum in the photo, they are traced in the lenticular body of clays and weakly in the scree of the foot; squiggly dash – exits of layering planes of clay; double dash – outcrop of layering planes in the scree of the foot. They are also traced into technogenic bodies above.
Bottom picture (OP 29) in the axial part of the "Pivdennyi" quarry, where interspersed relatively undisturbed blocks of ferruginous quartzite (light outcrops), rich martite ore ("bruises", dark outcrops) and technogenic accumulations can be seen interspersed.
All of them are structurally and texturally ordered in the form of banding, which have the same bedding elements for all the listed geological formations. For other designations, see above

Table 1

Bedding elements and relative displacements of individual surviving block of the western side of the "Pivdennyi" quarry

№ i/s	OP	Dip of planar structures				Changing the spatial position of the block relative to the previous one (angle of relative rotation, °), by:		Angle of rotation, block relative to the statistical average, (°) by:	
		azimuth,°	average value	angle,°	average value	vertical axis	horizontal axis	vertical axis	horizontal axis
1	1	270	267,75	86	79,75	–	–	– 65,3	+ 30,9
2		273		68					
3		273		78					
4		255		87					
5	2	270	285	75	53,75	+ 17,25	– 26	– 48	+ 4,9
6		290		55					
7		270		35					
8		310		50					
9	6	255	264	45	52,8	– 21	– 0,95	– 69	+ 4
10		250		55					
11		280		44					
12		250		60					
13		285		60					
14	7	330	286,6	35	40,3	+ 22,6	– 12,5	– 46,4	– 8,5
15		290		30					
16		240		56					
17	8	285	306,6	53	51	+ 20	+ 11,3	– 26,6	+ 2,2
18		315		50					
19		320		50					
20	12	290	277	30	41,6	– 29,6	– 9,4	– 56	– 7,2
21		265		45					
22		290		33					
23		270		35					
24		270		65					
25	14	245	277,5	35	52	+ 0,5	+ 10,4	– 55,6	+ 3,2
26		280		55					
27		280		40					
28		270		58					
29		300		62					
30		290		62					
31	16	340	311,6	52	56	+ 34,1	+ 4	– 21,4	+ 7,2
32		300		61					
33		295		55					
34	17	325	335	25	25	+ 23,4	– 31	+ 2	– 23,8
35		345		25					
36	18	312	293,7	57	53	– 41,3	+ 28	– 39,3	+ 4,2
37		293		42					
38		320		45					
39		250		68					
40	19	290	300	30	29,7	+ 6,3	– 23,3	– 33	– 19,1
41		300		27					
42		310		32					
43	20	320	310	40	39	+ 10	+ 19,7	– 23	– 9,8
44		300		38					
45	25	20	16,7	35	35,3	+ 66,7	– 3,7	+ 43,7	– 13,5
46		10		35					
47		20		36					
48	26	320	317,5	45	49	– 59,2	+ 13,7	– 15,5	+ 0,2
49		315		53					
The average value for all studied surviving block on the west side			333	–	48,8	3,82	– 1,5	– 32, 4	– 1,8

Table 2

Bedding elements and relative displacements of individual surviving block of the eastern side of the "Pivdennyi" quarry

№ i/s	OP	Dip of planar structures				Changing the spatial position of the block relative to the previous one (angle of relative rotation, °), by:		Angle of rotation, block relative to the statistical average, (°) by:	
		azimuth,°	average value	angle,°	average value	vertical axis	horizontal axis	vertical axis	horizontal axis
1	9	265	286,7	30	28	–	–	– 6,6	– 3,9
2		300		27					
3		295		27					
4	10	285	298	33	38,2	+ 11,3	+ 10,2	+ 4,7	+ 6,3
5		320		40					
6		305		40					
7		305		38					
8		275		40					
9	11	275	275	40	40	– 23	+ 1,8	– 18,3	+ 8,1
10	21	290	295	47	42	+ 20	+ 2	+ 1,7	+ 10,1
11		300		37					
12	23	285	295	10	10	0	– 32	+ 1,7	– 21,9
13		305		10					
14	31	270	284,3	39	33	– 10,7	+ 23	– 8,7	+ 1,1
15		290		26					
16		293		34					
The average value for all studied surviving block on the side			293,3	–	31,9	– 0,5	+ 1	– 4,3	– 0,03

Table 3

Bedding elements and relative displacements of heap, scree and structuring planes and boundaries between technogenic accumulations and surviving blocks of the "Pivdenniy" quarry

№ i/s	OP	Dip of planar structures				Changing the spatial position of the block planes relative to the previous one (angle of relative rotation, °), by:		Angle of rotation, block planes relative to the statistical average, (°) by:	
		azimuth,°	average value	angle,°	average value	vertical axis	horizontal axis	vertical axis	horizontal axis
1	3	295	327,5	30	42,5	–	–	– 22,5	– 17,1
2		0		55					
3	4	230	230	88	88	– 97,5	+ 45,5	– 120	+ 28,4
4	5	320	320	22	22	+ 90	– 66	– 30	– 37,6
5	7	70	70	75	75	+ 110	+ 53	+ 80	+ 15,4
6		70		75					
7	13	345	36,5	90	80	– 33,5	+ 5	+ 46,5	+20,4
8		88		70					
9	29	270	270	50	50	– 126,5	– 30	– 80	– 9,6
The average value for studied technogenic accumulations on th side			350	-	59,6	– 11,5	+ 1,5	– 21	– 0,02

Table 4

Summary structures data of the "Pivdennyi" quarry

Object	Average dip of planar structures		Blocks rotation, (°)	
			Sum / statistical average	
	azimuth, °	angle, °	by the vertical axis	by the horizontal axis
surviving blocks of the western side	333	48,8	– 201,8 / – 14,3	– 22,4 / – 1,7
surviving blocks of the eastern side	293,3	31,9	– 14 / – 1,9	2,4 / 0,5
technogenic formation	350	61,7	– 91,8 / – 16,3	3,7 / 0,7

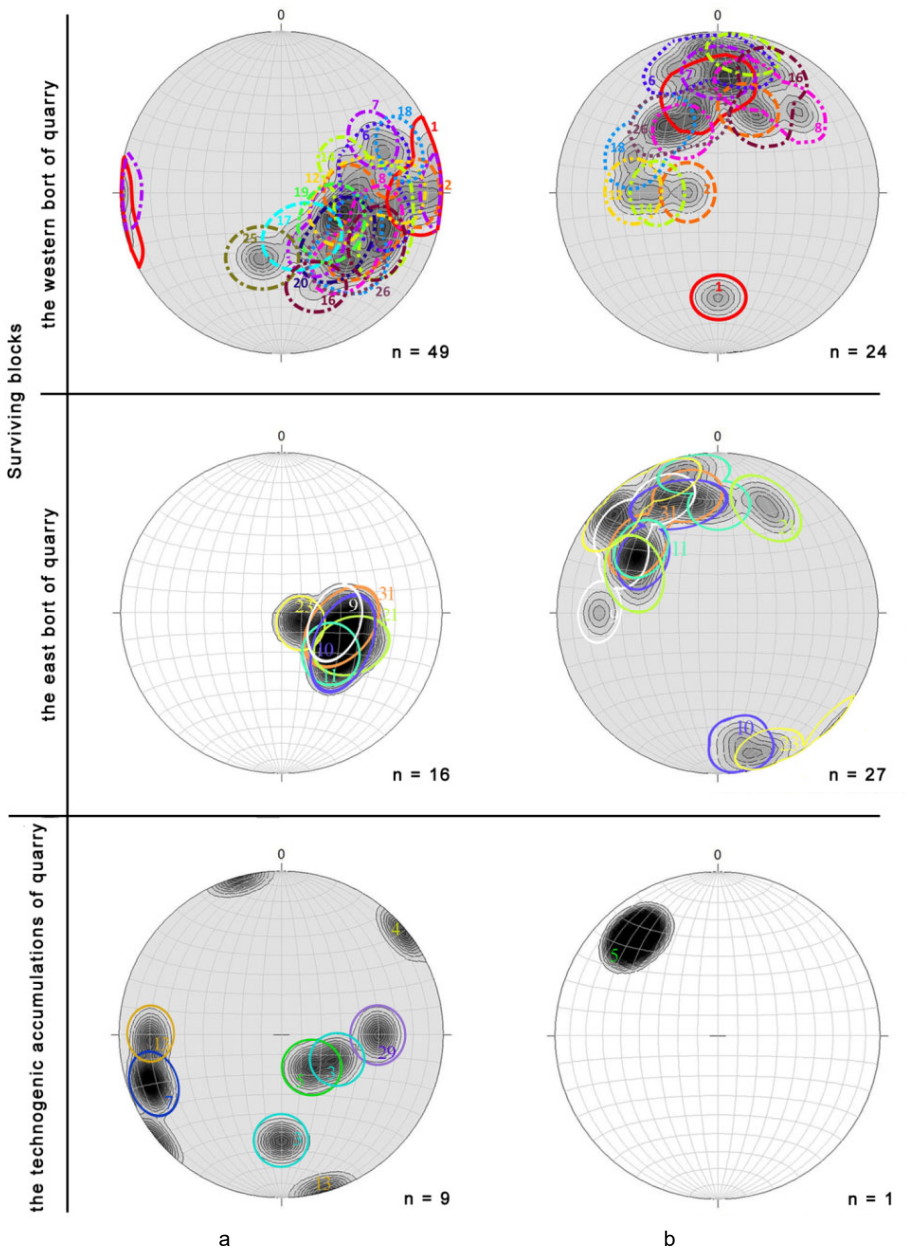


Fig. 5. Stereograms of the studied structures of the "Pivdennyi" quarry, where the projections of each of the studied blocks are drawn with different contours and numbers.
a – planar structures, b – linear structural. Numbers correspond to observation points. Projection to the lower hemisphere. Gradation of isolines: 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15. n – number of measurements. StereoNett 2.46 program

The average dip azimuth (on 9 measurements) of technogenic layers of the quarry is 350°, the average dip angle (on 9 measurements) is 61.7°. The angles of displacement of the blocks (structured embankments and scree between the surviving blocks) are comparable in similar indicators of the western side of the quarry, but on the horizontal axis with the opposite sign.

Discussion and conclusions

1. The formation of the system of blocks of the "Pivdennyi" quarry took place during the rotation around the vertical axis counterclockwise. While the greatest value of such rotation was for the surviving blocks of the western side, the smallest – for the eastern side. The difference between the borts, according to the average value of the measurements, is 39.7°. The calculated average rotation of the block on the western bort is 14.3°. Eastern – 1.9°.

Also, with this formation, there was scrolling around the horizontal axis, the largest such scrolling was for the surviving blocks of the western bort with a negative sign, the smallest for the surviving blocks of the eastern bort with a positive sign. The difference between the borts, according to the average value of the measurements, is 16.9°. The calculated average rotation of the block of the western bort around the horizontal axis is 1.7°. Eastern – 0.5°.

That is, the degree of technogenic disturbance of the western bort is an order of magnitude higher compared to the eastern bort of the "Pivdennyi" quarry.

Blocks of technogenic layering occupy an intermediate position according to the indicated indicators between the western and eastern borts of the quarry.

2. The spatial formation of the newly formed planes of technogenic accumulations took place with the inheritance

of the structural anisotropy existing in the surviving blocks with the creation of its own stratification. That is, surviving blocks and technogenic accumulations developed in a coordinated manner as a complete object. Therefore, the studied technogenic geological formation is a system: "surviving blocks-technogenic accumulations", which was formed over years – decades in surface conditions.

3. For the most part, the processes developing in the landscapes of technogenesis zones are considered undesirable and destructive. In this case, constructive phenomena were recorded – the transformation of technogenic accumulations, their "completion"/structuring, as a result of which the integrity of disturbed, even completely disappeared sections of the geological volume is restored. So, in technogenic accumulations, physico-chemical processes similar to natural ones occur, they are activated due to human economic activity and are aimed at preserving the natural balance of the environment. According to G.I. Denisik and G.M. Zadorozhnya the detected neoplasms can be classified as primary derivatives, micro-mesolevel, superficial, unconsciously regulated.

4. The phenomena described above are practically a natural laboratory of processes of formation of structural and textural elements in loose accumulations. Their tracking in time would actually make it possible to observe the processes of self-creation/reproduction of modern technogenic-natural objects.

5. Identification and ranking according to certain features of the structural elements of technogenic bodies can be used as one of the criteria for assessing the assimilation potential (according to (Dovgii et al., 2016)) of the technogenic changed geological environment.

6. The study of structural new formations in technogenic accumulations can be used in the future to assess the suitability of these accumulations for economic development. After all, the conditions of occurrence and the degree of maturity of such neoplasms will determine the level of stability of the man-made environment.

Authors' contribution: Liubov Osmachko – conceptualization, formal analysis, methodology, writing (original draft); Valentin Verkhovtsev – conceptualization, writing (review and editing).

Acknowledgments, sources of funding: The authors of the article express their sincere gratitude to the management and geologists of "RUDOMAIN" LLC for technical assistance in the research, as well as for providing comprehensive explanations and consultations.

References

Denisik, G. I., & Zadorozhnya, G. M. (2013). *Derivatives of processes and phenomena in landscapes zones technogenesis*. "Edelveis & K" [in Ukrainian]. [Денисик, Г. І,. & Задорожня, Г. М. (2013). *Похідні процеси та явища в ландшафтах зон техногенезу*. ПП "Едельвейс і К"].

Dovgii, S. O., Ivanchenko, V. V., Korzhnev, M. M., Kurylo, M. M., Trofymchuk, O. M., Chumachenko, S. M., Yakovlev, E. O., & Belitska, M. V. (2016). *Assimilation potential of the geological environment of Ukraine and its evaluation*. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Telecommunications and Global. information space. Nika-Center [in Ukrainian]. [Довгий, С. О., Іванченко, В. В., Коржнев, М. М. (ред.), Курило, М. М., Трофимчук, О. М., Чумаченко, С. М., Яковлєв, Є. О., & Беліцька, М. В. (2016). *Асиміляційний потенціал геологічного середовища України та його оцінка*. НАН України, Інститут телекомунікацій і глобал. інформ. простору. Ніка-Центр].

Extraction of iron ores of site No. 2 of the "Pivdennyi" quarry (iron ores of re-development of the fifth iron horizon). (2018). Report on the environmental impact assessment. Registration number of the case on the environmental impact assessment of the planned activity – 20189171722. Dnipro [in Ukrainian]. [Видобування залізних руд ділянки № 2 кар'єру "Південний" (залізні руди повторної розробки п'ятого залізистого горизонту). (2018). Звіт з оцінки впливу на довкілля. Реєстраційний номер справи про оцінку впливу на довкілля планованої діяльності – 20189171722. Дніпро].

Geological and economic evaluation of the feasibility of attracting poor ores with an on-board Fe content of 36 % within the boundaries of site No. 2 of the "Pivdennyi" quarry in the city of Kryvyi Rih, Dnipropetrovsk region. [Text, maps] (2018). Report on the exploration of a solid mineral deposit. Geoprof; resp. exclamation Kotenko, O. K. [in Ukrainian]. [Геолого-економічна оцінка доцільності залучення бідних руд при бортовому вмісті Fe – 36 % у межах ділянки № 2 кар'єру "Південний" у м. Кривий Ріг Дніпропетровської області. [Текст, карти]. (2018). Звіт про розвідку родовища твердих корисних копалин. Геопроф; відп. вик. Котенко, О. К.].

Geological investigation of the deposit of oxidized iron ores of the 5th and 6th iron horizons of the saksagan suite of the Kryvyi Rih series of plots No. 2 and No. 3 of the " Pivdennyi " quarry (c. Kryvyi Rih)" with the study of technogenic disturbance of the primary geological environment as a result of long-term exploitation of the deposit by open and underground mining methods. (2023). Report (final) on the SRW under the contract No. 02/2023-IGNS dated June 13, 2023 with RUDOMAIN LLC. Science. manager Verkhovtsev, V. G., resp. performed by Pokaliuk, V. V.; Kyiv, State University "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine" [in Ukrainian]. [Геологічне дослідження родовища окислених залізних руд 5-го та 6-го залізистих горизонтів саксаганської світи криворізької серії ділянок № 2 і № 3 кар'єру "Південний" (м. Кривий Ріг)" з вивченням техногенної порушеності первинного геологічного середовища внаслідок багаторічної експлуатації родовища відкритим і підземним способами видобутку. (2023). Звіт (заключний) про НДР за договором № 02/2023-ІГНС від "13" червня 2023 р. з ТОВ "РУДОМАЙН". Наук. керівник Верховцев, В. Г., відп. виконавець Покалюк, В. В.; Київ, ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України"].

Korzhnev, M. M., Vyzhva, S. A., Koshlyakov, O. E., Gozhik, A. P., Korneyenko, S. V., Baisarovych, I. M., Aksyom, O. S., & Sukhina, O. M. (2005). *Ecological geology*. PPC "Kyiv University" [in Ukrainian]. [Коржнев, М. М. (ред.), Вижва, С. А., Кошляков, О. Є., Гожик, А. П., Корнєєнко, С. В., Байсарович, І. М., Аксьом, О. С., & Сухіна, О. М. (2005). *Екологічна геологія*. ВПЦ "Київський університет"].

Lukienko, O. I., Vakarchuk, S. G., & Kravchenko, D. V. (2014). *Structural and paragenetic analysis (on a tectonofacies basis). Book 1: Epizone*. VOC "Kyiv University" [in Ukrainian]. [Лукієнко, О. І., Вакарчук, С. Г., & Кравченко, Д. В. (2014). *Структурно-парагенетичний аналіз (на тектонофаціальній основі). Книга 1: Епізона*. ВПЦ "Київський університет"].

Lukienko, O. I., Yanchenko, V. P., & Kravchenko, D. V. (2018). *Structural and paragenetic analysis (on a tectonofacies basis). Book 2: Mesozone and Catazone*. VOC "Kyiv University" [in Ukrainian]. [Лукієнко, О.І., Янченко, В.П., Кравченко, Д.В. (2018). *Структурно-парагенетичний аналіз (на тектонофаціальній основі). Книга 2: Мезозона та катазона*. ВПЦ "Київський університет"].

Nikitenko, I. S. (2023). *Petrology of stone materials of the Middle Dnipro Region archaeological objects*. Extended abstract of Doctor's dis. (Geol.). M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine [in Ukrainian]. [Нікітенко, І. С. (2023). *Петрологія кам'яної сировини археологічних об'єктів Середнього Подніпров'я*. Автореф. дис. д-ра геол. наук. Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України].

Protocol No. 4472 of the meeting of the collegium of the State commission of Ukraine on mineral reserves at the State geology and subsoil service of Ukraine from august 15, 2018, on the consideration of generalized materials on the geological study of iron ore reserves of site No. 2 of the "Pivdennyi" quarry, submitted by LLC " RUDOMAIN" with the aim of obtaining consultation and methodical assistance regarding whether the assessed subsoil area belongs to technogenic deposits (2018) [in Ukrainian]. [Протокол № 4472 засідання колегії Державної комісії України по запасах корисних копалин при Держ. Службі геології та надр України від 15 серпня 2018 року, з розгляду узагальнених матеріалів з геологічного вивчення запасів залізних руд ділянки № 2 кар'єру "Південний", поданих ТОВ "РУДОМАЙН" з метою отримання консультації і методичної допомого щодо належності оціненої ділянки надр до родовищ техногенного типу. (2018)].

Отримано редакцією журналу / Received: 19.04.24
Прорецензовано / Revised: 31.07.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Любов ОСЬМАЧКО, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0003-1248-261X
e-mail: osml@ukr.net.
Державна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України", Київ, Україна

Валентин ВЕРХОВЦЕВ, д-р геол. наук
ORCID ID: 0000-0002-1015-6725
e-mail: verkhovtsev@ukr.ne
Державна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України", Київ, Україна

ПРО СТРУКТУРИЗАЦІЮ ТЕХНОГЕННО ЗМІНЕНИХ ОБ'ЄМІВ КАР'ЄРУ "ПІВДЕННИЙ" М. КРИВИЙ РІГ

В с т у п . ***Дослідження проводилися в межах залізорудного кар'єру "Південний" м. Кривий Ріг з метою комплексного і ефективного в подальшому використання техногенно перетворених ділянок надр і земної поверхні Кривбасу. Наведено короткий огляд досягнень попередніх дослідників.***

М е т о д и . ***Застосовано загальноприйняті методи досліджень. Виконано фіксацію елементів залягання у відносно непорушених невеликих за розмірами блоках (далі – блоках або "блочках") кварцитів і сланців саксаганської світи (ціликах) та в блочках розмежування ціликів – техногенних нагромадженнях. У відносно непорушених блочках кварцитів замірялися такі елементи для смугастості, сланцюватості, лінійності за мінеральними агрегатами, осями складчастих форм, штрихами, борознами тощо. Фактичний матеріал щодо розміщення структурних елементів опрацьовано за допомогою програми StereoNett 2.46, також зроблено розрахунки зміщень блочків досліджуваних утворень.***

Р е з у л ь т а т и . ***Серед техногенних нагромаджень (осипів, насипів й заповнених штучних порожнин), за ступенем структуризації, спостережено неструктуровані та різною мірою структуровані. У межах останніх фіксовано шаруватість, механічну сланцюватість та лінійність. З'ясовано, що становлення системи блочків кар'єру "Південний" чинилося за їх обертання як по вертикальній, так і по горизонтальній осях.***

В и с н о в к и . ***Виникнення новоутворених площин техногенних нагромаджень відбулося з успадкуванням існуючої в ціликах структурної анізотропії зі створенням власної стратифікації. Отже, досліджувана система "блочки ціликів – техногенні нагромадження" розвивалася й формувалися як цілісний об'єкт, взаємоузгоджено, роки – десятиліття в поверхневих умовах.***

Перетворення техногенних нагромаджень, їх "добудова"/структуризація, внаслідок яких відновлюється цілісність порушених і зниклих ділянок геологічного об'єму є конструктивними явищами. Вони практично є природною лабораторією процесів формування структурно-текстурних елементів у сипких нагромадженнях. Їх відстеження в часі дало б змогу фактично спостерігати процеси самостворення/відтворення сучасних техногенно-природних об'єктів. Ранжування структурних новоутворень в техногенних нагромадженнях може бути застосовано як один з критеріїв оцінки асиміляційного потенціалу цих нагромаджень та сприятливості для господарського освоєння.

К л ю ч о в і с л о в а : ***залізисті горизонти, кар'єр "Південний", непорушені блочки, техногенні нагромадження, елементи залягання, структуризація.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 553.048
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.09

Володимир МИХАЙЛОВ, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-1837-9739
e-mail: vladvam@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ЗАЛІЗОРУДНА ГІРНИЧОДОБУВНА ПРОМИСЛОВІСТЬ УКРАЇНИ У СВІТОВОМУ КОНТЕКСТІ

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

Розглянуто структуру залізорудної гірничодобувної промисловості України, її роль і значення у світовому видобутку залізних руд. Показано, що гірничозбагачувальні комбінати галузі є одними з головних бюджетоформуючих підприємств України. Проведено оцінку стану і прогнозування розвитку мінерально-сировинної бази залізних руд України з урахуванням кон'юнктури світового ринку і прогнозної оцінки його потреб. Розглянуто світові тенденції розвитку залізорудної гірничодобувної промисловості, показано, що загальною світовою тенденцією за останні передвоєнні п'ять років (2017–2021) було поступове збільшення видобутку залізних руд. Наведено стислу характеристику залізорудних басейнів України. Охарактеризовано найважливіші гірничодобувні підприємства України. Показано, що залізні руди є традиційним видом гірничорудної сировини України, інвестиційна привабливість якої ґрунтується на значних запасах, багаторічному досвіді розробки, розвиненій інфраструктурі.

Ключові слова: *мінерально-сировинна база, родовище, залізні руди, гірничо-збагачувальний комбінат, інвестиції.*

Вступ

Постановка проблеми. Залізо належить до стратегічних корисних копалин України. Загальнодержавною програмою розвитку мінерально-сировинної бази (МСБ) України на період до 2030 р. (Закон України…, 2021) передбачено нарощування МСБ залізних руд. Гірничозбагачувальні комбінати (ГЗК) галузі є одними з головних бюджетоформуючих підприємств України, тому аналіз сучасного стану і розробка стратегії залізорудної гірничодобувної промисловості України, особливо в умовах повоєнного відновлення нашої країни, є надзвичайно актуальним і своєчасним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залізорудним басейнам України присвячена значна кількість наукових робіт, у яких досліджуються питання їх геологічної будови (Белевцев, & Белевцев, 1981; Белевцев и др., 1981; Гурський та ін., 2006; Михайлов та ін., 2007; Рудько, Плотніков, & Радованов, 2013; Смірнов, Євтєхов, & Євтєхов, 2010, 2012); розглядається їх ресурсна база (Зарицький та ін., 1994; Кулиш и др., 1971; Мінеральні ресурси…, 2020); наводиться геолого-економічна оцінка (Кулиш, & Плотников, 2005; Рудько та ін., 2010; Рудько, Курило, & Радованов, 2011; Рудько, Плотніков, & Радованов, 2012); розбираються правові аспекти переробки залізних руд (Михайлов та ін., 2022), їх стратегічне значення для економіки нашої країни (Гурський, 2008; Михайлов, 2023[1,2]; Mykhailov, Hrinchenko, & Malyuk, 2022; Mykhailov et al., 2023).

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Однак залізорудна гірничодобувна промисловість України стикається з цілим рядом проблем, які ускладнюють її розвиток, а саме: проблеми вичерпання багатих залізних руд; їх якості; удосконалення технології їх збагачення і комплексного використання; правові питання переробки залізних руд; підвищення якості товарної продукції, високого зносу основних засобів на всіх перелічених підприємствах; визначення перспектив розвитку залізорудної промисловості з урахуванням загальносвітових векторів і тенденцій. Всі ці питання потребують подальшого вивчення.

Формулювання цілей статті. Мета статті – оцінка стану і прогнозування розвитку МСБ залізних руд України з урахуванням кон'юнктури світового ринку і прогнозної оцінки його потреб. Частково ці питання розглянуто в попередній статті автора (Михайлов, 2024).

Світові тенденції розвитку залізорудної гірничодобувної промисловості. Залізо становить основу світового металургійного виробництва, але також широко застосовується в різноманітних сплавах і порошках, які використовуються в електротехніці (сердечники електромагнітів і якорів, платини акумуляторів, магнітопроводи трансформаторів і електродвигунів), як анод у залізонікелевих і залізно-повітряних акумуляторах, у піротехніці, електрозварюванні, поліграфії, медицині, текстильній промисловості тощо.

Родовища залізних руд відомі більш ніж у 130 країн світу, їх загальні ресурси сягають 180 млрд т (заліза – 85 млрд т). Найбільшими ресурсами залізних руд володіють (млрд т): Австралія (51,0), Бразилія (34,0), Росія (29,0), Китай (20,0), Індія (5,5), Україна (6,5), Канада (6,0), США (3,0), Іран (2,7), Перу (2,6), Казахстан (2,5), Швеція (1,3), ПАР (1,0,). Що стосується видобутку залізних руд, то у 2022 р. найбільше видобували (млн т): Австралія (880), Бразилія (410), Китай (380), Індія (290), Росія (90), Україна (76), ПАР (76), Іран (75), Казахстан 966) і Канада (46) (табл. 1).

Загальною світовою тенденцією за останні передвоєнні п'ять років (2017–2021) було поступове збільшення світового видобутку залізних руд з 1 511 759 тис. т у 2017 р. до 1 635 056 тис. т у 2021 р. (+8,2 %) (табл. 2). З провідних залізодобувних країн, видобуток заліза в яких перевищує 10 млн т, найбільш динамічним було зростання видобутку в Ірані (+59,8 %), Мексиці (+53,7 %), Перу (+38,0 %), Казахстані (+36,4 %), Україні (+35,2 %), Китаї (+18,1 %), Чилі (+16,9 %), Канаді (+14,3 %). Помірним зростанням видобутку заліза характеризується промисловість Швеції (+6,5 %) і Австралії (+4,2 %), у той час як обсяг видобутку знизився у Бразилії (-5,5 %), Росії (-4,6 %), ПАР (-2,7 %), США (-0,3 %). З інших країн, з видобутком заліза менш як 10 млн т, особливо динамічним було зростання обсягів видобутку в Лаосі (+1409,3 %), Ліберії (+311,5 %), Індонезії (+306,7 %), Туреччині (+60,6 %), Монголії (+19,2 %), у той час як низка країн скоротила видобуток: Венесуела (-68,7 %), Північна Корея (-56,1 %), В'єтнам (-33,8 %). Несуттєво змінилися обсяги видобутку заліза у Мавританії (+6,8 %), Нової Зеландії (-5,4 %), Австрії (+11,1 %), Норвегії (+6,5 %). Цим країнам належить понад 99 % світового видобутку заліза (99,73 %).

Таблиця 1

Видобуток і ресурси залізних руд у світі (Mineral Commodity…, 2023)

Країна	Видобуток, тис. т				Ресурси, млн т	
	Руда		Залізо		Руда	Залізо
	2021	2022	2021	2022		
Австралія	912 000	880 000	565 000	540 000	51 000	27 000
Бразилія	431 000	410 000	273 000	260 000	34 000	15 000
Китай	394 000	380 000	246 000	240 000	20 000	6 900
Індія	273 000	290 000	169 000	180 000	5 500	3 400
Росія	96 000	90 000	66 700	63 000	29 000	14 000
Україна	83 800	76 000	52 400	47 000	6 500	2 300
ПАР	73 100	76 000	46 500	48 000	1 000	670
Іран	72 900	75 000	47 900	49 000	2 700	1 500
Казахстан	64 100	66 000	13 100	14 000	2 500	900
Канада	57 500	58 000	34 500	35 000	6 000	2 300
США	47 500	46 000	30 100	29 000	3 000	1 000
Швеція	40 200	39 000	28 600	28 000	1 300	600
Перу	18 100	17 000	12 100	11 000	2 600	1 200
Туреччина	16 100	17 000	9 710	10 000	130	38
Чилі	17 700	16 000	11 200	10 000	н/зв	н/зв
Мавританія	12 800	13 000	8 000	8 100	н/зв	н/зв
Мексика	10 800	11 000	6 810	6 900	н/зв	н/зв
Інші країни	56 700	59 000	4 900	5 000	18 000	9 500
Всього у світі	**2 680 000**	**1 630 000**	**1 630 000**	**1 600 000**	**180 000**	**85 000**

Таблиця 2

Світовий видобуток заліза (World Mining…, 2023)

Країна	Видобуток, тис. т						
	2017	2018	2019	2020	2021	% світового	2021/2017 %
Австралія	548 297	560 055	567 957	568 384	571 114	34,93	+4,2
Бразилія	289 090	287 617	255 339	245 952	273 330	16,72	-5,5
Китай	215 920	209 244	219 375	225 400	254 900	15,59	+18,1
Індія	125 717	129 616	151 827	126 309	156 452	9,57	+24,4
Росія	62 186	64 192	65 726	65 372	59 376	3,63	-4,6
Україна	38 768	38 751	47 584	49 274	52 431	3,21	+35,2
ПАР	48 809	48 277	47 064	36 163	47 509	2,91	-2,7
Канада	30 683	32 181	33 020	35 775	35 070	2,14	+14,3
Іран	21 884	24 700	28 305	33 660	34 980	2,14	+59,8
США	30 177	31 185	29 547	24 100	30 100	1,84	-0,3
Швеція	18 741	18 405	19 367	20 112	19 964	1,22	+6,5
Казахстан	11 706	12 969	14 279	15 105	15 966	0,98	+36,4
Перу	8 806	9 534	10 120	8 894	12 149	0,74	+38,0
Чилі	9 549	8 943	8 427	9 891	11 163	0,68	+16,9
Мексика	7 028	8 413	10 331	10 775	10 800	0,66	+53,7
Туреччина	6 095	9 547	8 829	13 087	9 791	0,60	+60,6
Мавританія	7 679	6 962	7 928	8 135	8 202	0,50	+6,8
Монголія	4 309	3 486	4 800	5 166	5 136	0,31	+19,2
Індонезія	1 076	600	1 379	2 951	3 300	0,20	+306,7
Малайзія	2 469	2 113	2 621	3 384	3 071	0,19	+24,4
Ліберія	963	2 794	2 657	2 925	3 000	0,18	+311,5
Нова Зеландія	2 325	2 100	1 915	2 260	2 200	0,13	-5,4
В'єтнам	3 309	3 353	3 663	2 136	2 191	0,13	-33,8
Лаос	150	60	282	608	2 114	0,13	+1409,3
Північна Корея	3 646	2 083	1 796	1 640	1 600	0,10	-56,1
Венесуела	4 615	2 018	2 063	1 235	1 463	0,09	-68,7
Гвінея	-	-	-	419	1 139	0,07	-
Австрія	954	897	1 037	974	1 060	0,06	+11,1
Норвегія	993	1 130	1 070	1 015	1 058	0,06	+6,5
Інші	5 815	3 349	3 027	3 038	4 427	0,29	-23,9
Всього	**1 511 759**	**1 524 574**	**1 551 335**	**1 524 139**	**1 635 056**	**100,00**	**+8,2**

Інші – країни, що видобувають менш як 1 млн т залізної руди (Алжир, Аргентина, Болівія, Боснія-Герцеговина, Бутан, Гватемала, Єгипет, Колумбія, Конго ДР, Малаві, Марокко, Намібія, Непал, Нігерія, Німеччина, Південна Корея, Пакистан, Саудівська Аравія, Сьєрра-Леоне, Таїланд, Танзанія, Туніс, Уганда, Уругвай, Фіджі, Філіппіни)

Отже, в останні передвоєнні роки у світі спостерігалася стійка тенденція до повільного зростання видобутку заліза. Треба очікувати, що ця тенденція збережеться й надалі.

Результати

Гірничодобувна промисловість України. Як показано в попередній статті (Михайлов, 2024), гірничодобувна промисловість України за останні сім передвоєнних років (2015–2021) виказувала стійку тенденцію до зростання. Так, якщо у 2015 р. загальний обсяг видобутої мінеральної сировини в Україні становив 97,8 млн т, то у 2021 р. – 107,7 млн т (+10,1 %). Водночас найсуттєвішим було зростання видобутку (табл. 3): графіту (+70,0 %), сірки (+48,9 %), гіпсу (+42,1 %), польового шпату (+35,0 %),

титану (+30,3 %), каоліну (+27,7 %), заліза (+22,5 %), марганцю (+19,3 %), коксівного вугілля (+19,3 %). Разом з тим загрозливим виглядає різке падіння видобутку галію (-55,6 %), урану (-53,6 %), бентоніту (-43,2 %), суттєве – солі (-11,1 %), циркону (-10,0 %), вугілля (-7,1 %), незначне – нафти (-3,1 %) і газу (-0,7 %).

Ці тенденції потрібно враховувати при плануванні повоєнного відродження нашої країни, зважаючи на ті значні зміни, яких зазнала промисловість України після 24 лютого 2022 р.

Залізорудні басейни України. За ресурсами і видобутком залізних руд Україна посідає одне з перших місць у світі. Тут відомо п'ять залізорудних басейнів та районів (ЗРР): Криворізький, Кременчуцький, Білозерський, Приазовський, Керченський (рис. 1). Станом на 01.01.2020 р. у Державному балансі запасів корисних копалин України враховано 60 родовищ, 25 з яких розробляються; загальні запаси залізних руд становлять 31,4 млрд т (у т. ч. балансові за категоріями $A+B+C_1$ – 18,8 млрд т, C_2 – 7,6 млрд т, позабалансові – 5,0 млрд т), ресурси – 133,0 млрд т; у 2019 р. в Україні було видобуто 157,4 млн т руди (Мінеральні ресурси…, 2020). Це повністю задовольняє потреби гірничорудної промисловості України й забезпечує можливості експорту залізних руд на світові ринки.

Основним залізорудним районом України є Криворізький, складений осадовими і вулканогенно-осадовими глибоко метаморфізованими утвореннями палеопротерозою криворізької серії, у складі якої виділяють такі світи (знизу): новокриворізька, скелюватська, саксаганська, гданцевська і глеюватська, що їх перекриває (рис. 2). Основною продуктивною товщею є саксаганська світа, у складі якої виділяють сім залізистих горизонтів завтовшки 20–145 м. Вони складені різноманітними за складом залізистими кварцитами (магнетитовими, силікат-магнетитовими, магнетит-силікатними, магнетит-карбонатними, магнетит-карбонат-силікатними, карбонат-магнетитовими, карбонат-силікат-магнетитовими, карбонат-силікатними, гематит-магнетитовими), які в зонах гіпергенезу перетворені на мартитові і гематит-мартитові руди. Виділяють кілька геолого-промислових типів руд: саксаганський, інгулецький, першотравневний (багаті руди із вмістом заліза 46 % і більше), скелюватський, правобережний, верхівцевський, білогородський (бідні руди із вмістом заліза 20–45 %). Для руд характерні смугасті текстури, чергування рудних і безрудних прошарків. Рудні мінерали утворюють дрібну вкрапленість серед нерудних, агрегати і зростки з останніми. Ці особливості руд родовищ зумовлюють особливості їх подальшої обробки і збагачення.

Гірничодобувні підприємства. Видобуток залізних руд в Україні здійснюється рядом гірничодобувних підприємств, найголовнішими з яких є:

- підприємства групи "Метінвест", а саме Центральний, Інгулецький, Північний і Південний ГЗК, які розроблюють родовища Велика Глеюватка, Петрівське, Артемівське, Інгулецьке, Первомайське, Ганнівське, Скелюватсько-Магнетитове, поле шахти ім. Орджонікідзе;
- "Арселорміттал" – Новокриворізьке і Валявкинське родовища, поле шахти ім. Артема;
- групи "Ferrexpo", до складу якої входять Полтавський і Єристівський ГЗК, що розроблюють Горишньплавнівське-Лавриківське і Єристівське родовища;
- ПАТ Криворізький залізорудний комбінат – шахти "Тернівська", "Гвардійська" (Козацька), "Октябрська" (Покровська), "Батьківщина" (Криворізька);
- ПАТ "Суха Балка" – шахти "Ювілейна", ім. Фрунзе;
- Запорізький залізорудний комбінат – Південнобілозерське, Переверзівське родовища

Найбільшими в Україні за видобутком залізних руд є ***підприємства групи "Метінвест".*** Так, за результатами 2019 р. ГЗК групи "Метінвест" було видобуто 93 565,4 тис. т залізних руд, або 61 % від обсягу залізних руд, видобутих в Україні (табл. 4). Ці підприємства є великими платниками податків і тим самім – бюджетоформуючими. Міжнародна група "Метінвест" об'єднує чотири ГЗК: ПРАТ "Центральний гірничо-збагачувальний комбінат" (ЦГЗК), ПРАТ "Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат" (ІНГЗК), ПРАТ "Північний гірничо-збагачувальний комбінат" (ПІВНГЗК), АТ "Південний гірничо-збагачувальний комбінат" (ПІВДГЗК).

Таблиця 3

Динаміка видобутку найважливіших корисних копалин України (World Mining…, 2023)

Сировина	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2021/2015 %
Залізо, т	42 817 200	40 240 600	38 767 600	38 751 300	47 584 000	49 274 000	52 431 000	+22,5
Марганець, т	546 600	491 500	650 500	682 700	698 100	698 500	652 300	+19,3
Титан, т	375 480	339 800	430 300	518 950	564 050	537 430	489 200	+30,3
Галій, т	9	9	9	6	5	4	4	-55,6
Германій, т	1	1	1	1	1	1	1	0
Бентоніт, т	220 000	200 000	113 200	178 200	124 700	125 000	125 000	-43,2
Польовий шпат, т	44 460	33 627	35 000	50 000	60 000	50 000	60 000	+35,0
Графіт, т	10 000	12 000	13 000	15 000	10 000	10 000	17 000	+70,0
Гіпс, т	1 254 900	1 303 000	1 528 900	1 386 400	1 409 400	1 529 000	1 783 300	+42,1
Каолін, т	1 814 786	2 335 004	2 379 636	2 091 525	1 843 561	1 680 891	2 317 723	+27,7
Сіль, т	2 136 500	1 783 530	1 815 684	2 191 619	2 092 795	2 075 000	1 900 000	-11,1
Сірка, т	171 700	171 300	175 900	222 200	220 400	223 500	255 600	+48,9
Циркон, т	30 000	29 280	27 239	21 614	18 000	16 000	27 000	-10,0
Вугілля, т	23 852 700	25 121 500	18 932 900	21 648 100	19 747 200	17 733 500	22 153 000	-7,1
Коксівне вугілля, т	6 063 900	6 508 800	5 233 900	4 606 300	5 783 200	6 434 800	7 234 000	+19,3
Газ, млрд $м^3$	19 900	20 052	20 510	20 806	20 520	20 183	19 757	-0,7
Нафта, т	2 533 300	2 272 100	2 169 900	2 293 300	2 453 600	2 430 800	2 455 400	-3,1
Уран, т	1 156	1 185	986	1 390	944	877	536	-53,6
Всього, т	**97 792 692**	**96 884 836**	**88 682 655**	**91 303 405**	**99 013 956**	**98 965 703**	**107 706 664**	**+10,1**

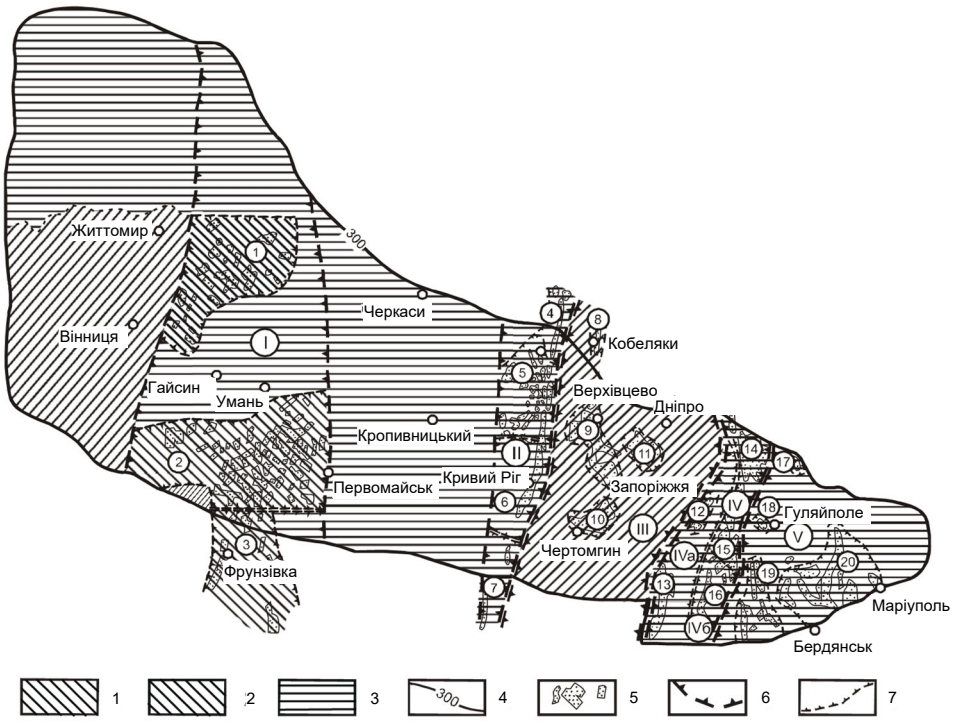


Рис. 1. Схема розташування залізорудних районів Українського щита (Михайлов та ін., 2007):
1 – вулканогенна формація; 2 – вулканогенно-осадова формація; 3 – осадова (теригенно-хемогенна) формація; 4 –межа УЩ; 5 – площі поширення залізистих порід; 6 – межі металогенічних зон і областей; 7 – межі районів.
Римські цифри – металогенічні області і зони: I – Одесько-Білоцерківська; II – Криворізько-Кременчуцька; III – Придніпровська; IV – Білозерсько-Оріхівська (підзони: IVa – Конксько-Білозерська, IVб – Оріхово-Павлоградська); V – Приазовська.
Арабські цифри – залізорудні райони й райони магнітних аномалій: 1 – Білоцерківсько-Володарський; 2 – Середньопобузький; 3 – Одесько-Ананьївський; 4 – Кременчуцький; 5 – Правобережний; 6 – Криворізький; 7 – Херсонський; 8 – Кобеляцький; 9 – Верхівцевський; 10 – Чортомлицький; 11 – Сурський; 12 – Конксьгий; 13 – Білозерський; 14 – Павлоградський; 15 – Оріхівський; 16 – Молочанський; 17 – Вовчанський; 18 – Гуляйпільський; 19 – Західноприазовський; 20 – Східноприазовський

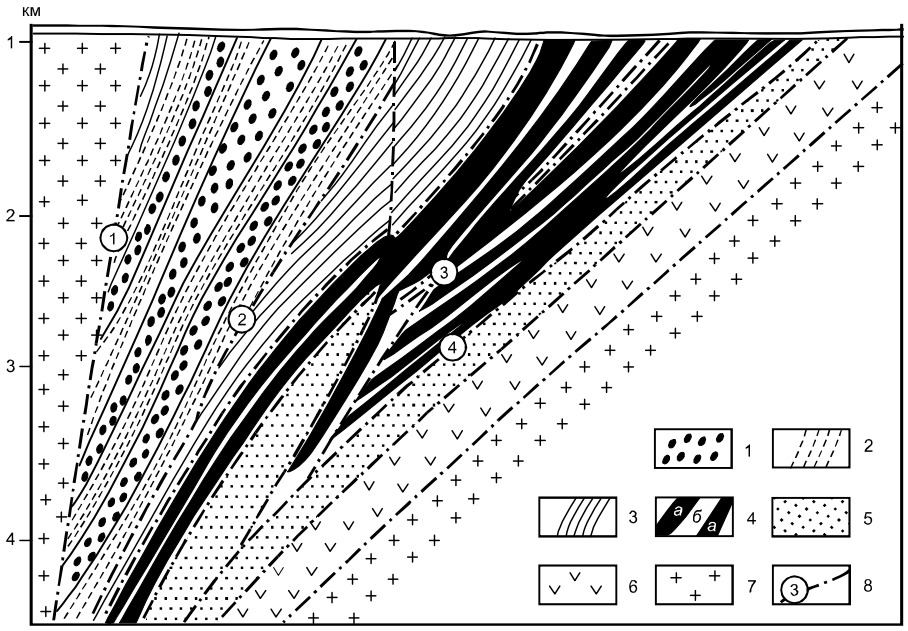


Рис. 2. Розріз Криворізького залізорудного району (Михайлов та ін., 2007):
світи: 1–2 – глеюватська: метапісковики, конгломерати (1), сланці біотитові (2); 3 – гданцевська; 4 – саксаганська: залізисті (а), сланцеві горизонти (б); 5 – скелюватська; 6 – новокриворізька; 7 – граніти і мігматити; 8 – розломи: Західний (1), Тарапаковський (2), Саксаганський (3), Східний (4)

Основний вид господарської діяльності цих ГЗК – видобуток корисних копалин, якими є кварцити залізисті, залізисті магнетитові, магнетитові залізисті, залізисті окиснені, на що у підприємств є відповідні спеціальні дозволи. Ці комбінати є підприємствами повного гірничо-збагачувального циклу від добування магнетитових

кварцитів з низьким вмістом заліза відкритим способом із подальшою переробкою шляхом збагачення та виробництва на гірничо-збагачувальному комплексі концентратів залізорудних магнетитових. Вони включають кілька виробництв: добувне, подрібнювальне і збагачувальне.

Центральний ГЗК здійснює видобуток, переробку руд і виробництво залізорудного концентрату та котунів для металургійної промисловості. Добувний комплекс підприємства представлений кар'єром № 1 на базі Глеюватського родовища (проєктна потужність 6,0 млн т магнетитових залізистих кварцитів на рік); кар'єром № 3 на базі Петрівського родовища (проєктна потужність 6,0 млн т); кар'єром № 4 на базі Артемівського родовища (проєктна потужність 4 млн т), а також шахтою ім. Орджонікідзе (Перша ділянка), яка розроблює магнетитові кварцити покладу "Південний-Магнетитовий" (проєктна потужність 1,6 млн т). Запаси, видобуток і середній вміст заліза цих родовищ наведено в табл. 4. Підприємство має необхідні спеціальні дозволи, дійсні до 2030 р. Переробний комплекс включає дробильну фабрику потужністю 28 млн т руди на рік, збагачувальну фабрику потужністю понад 6 млн т залізорудного концентрату на рік, фабрику огрудкування потужністю понад 2,0 млн т котунів на рік, допоміжні цехи, шламосховище. У 2020 р. на комбінаті було вироблено 4840 тис. т залізорудного концентрату із вмістом заліза 66,3–68,0 % і 2840 тис. т котунів із вмістом заліза 59,9–63,5 % (Михайлов, 2023[2]).

Таблиця 4

Видобуток і запаси залізних руд ГЗК України у 2019 р. (Михайлов, 2023[2])

Підприємство	Родовище	Видобуток тис. т	Запаси, тис. т	Вміст, %	
				$Fe_{заг.}$	$Fe_{магн.}$
Група "Метінвест: Центральний ГЗК	Велика Глеюватка	4 459,0	941 320	27,81-38,11	16,60-28,56
	Шахта ім. Орджонікідзе	1 217,0	512 217	36,01-38,83	23,44-29,57
	Петрівське	4 118,0	161 074	29,28-34,71	21,29-23,97
	Артемівське	1 911,0	132 054	36,80-37,54	24,63-39,14
Інгулецький ГЗК	Інгулецьке	27 748,5	1 835 813	18,96-26,02	31,11-34,10
Північний ГЗК	Первомайське	19 888,0	2 575 404	34,52-52,29	26,13-40,63
	Ганнівське	5 810,0	930 281	37,21-37,64	27,32-28,75
Південний ГЗК	Скелюватське-Магнетитове	28 413,9	1 740 166	30,13-37,25	28,14-29,42
Всього підприємствами "Метінвест"		**93 565,4 (61,0 %)**	**8 828 329**	**18,96-52,29**	**16,60-40,63**
ПАТ "АМКР"	Поле шахти ім. Артема	757,0	н/зв	н/зв	н/зв
	Новокриворізьке	9 854,0	1 080 952	31,0	21,32
	Валявкинське	13 423,0	1 635 983	36,85	28,70
Всього підприємствами "АМКР"		**24 034,0 (15,6 %)**	**2 716 935**	**31,0-36,85**	**21,32-28,70**
Група "Ferrexpo" ПРАТ "Полтавський ГЗК"	Горишньоплавнівське-Лавриківське	12 841,0	1 490 713	28,21-33,34	19,69-26,46
ПРАТ "Єристівський ГЗК"	Єристівське	11 521,0	1 383 142	27,07-34,52	17,81-28,15
Всього підприємствами "Ferrexpo"		**24 362,0 (15,9 %)**	**2 873 855**	**27,07-34,52**	**17,81-28,15**
ПАТ "Криворізький залізорудний комбінат"	Шахта "Тернівська"	1 157,3	149 860	57,4	н/зв
	Шахта "Гвардійська" (Козацька)	1 221,2	134 116	59,6	н/зв
	Шахта "Октябрська" (Покровська)	706,4	253 834	63,3	н/зв
	Шахта "Батьківщина" (Криворізька)	1 539,9	59 500	59,5	н/зв
Всього ПАТ "Криворізький залізорудний комбінат"		**4 624,8 (3,0 %)**	**597 310**	**57,4-63,3**	**н/зв**
ПАТ "Суха Балка"	Шахта "Ювілейна"	1 667,0	н/зв	н/зв	н/зв
	Шахта ім. Фрунзе	992,0	450	61,88	н/зв
Всього підприємствами ПАТ "Суха Балка"		**2 659,0 (1,7 %)**	**75 000**	**58,0-62,0**	**н/зв**
Запорізький залізорудний комбінат	Південнобілозерське	3 996,0	н/зв	н/зв	н/зв
	Переверзівське	381,0	386 044	24,5	н/зв
Всього Запорізький залізорудний комбінат		**4 377 (2,8 %)**	**619 630**	**н/зв**	**н/зв**
ВСЬОГО		**153 622,2**	**15 711 059**	**18,96-63,30**	**н/зв**

Запаси – загальні запаси родовища категорій $B+C_1+C_2$, які включають запаси балансові, умовно балансові, позабалансові, з невизначеним промисловим значенням

Інгулецький ГЗК – найбільший в Україні виробник залізорудного концентрату, розробляє Інгулецьке родовище залізистих кварцитів. Балансові запаси руди сягають 1,2 млрд т. Розробка родовища здійснюється кар'єром з виробничою потужністю гірничої маси 70 млн т на рік. Звідти руда потрапляє на дробильну фабрику з виробничою потужністю переробки понад 36 млн т руди на рік. Збагачення відбувається на двох збагачувальних фабриках з виробничою потужністю понад 14,5 млн т концентрату на рік із вмістом заліза 63,7–67,0 %. Технологічна схема збагачувальних фабрик передбачає чотири стадії підроблення, три стадії подрібнення і чотири-п'ять стадій магнітної сепарації. У результаті повного циклу збагачення із руди з масовою часткою загального заліза 32,6–36,7 % отримують концентрат з масовою часткою загального заліза 63,8–63,9 %, вологістю близько 10 %. Руди належать до категорії важко збагачувальних. Подальше збагачення здійснюється в цеху магнітно-флотаційного збагачення, де відбувається виробництво концентрату з масовою часткою заліза понад 67,0 %. У середньому комбінат випускає близько 12,4 млн т концентрату на рік. У 2010–2020 рр. ПАТ "ІНГЗК" реалізував залізорудний концентрат із вмістом заліза від 63,7 до 67,0 %. Річний обсяг реалізації приблизно сягав 10–14 млн т концентрату.

Північний ГЗК функціонує на базі Першотравневого і Ганнівського родовищ залізистих кварцитів із загальними запасами понад 3,1 млрд т руди, які розробляються кар'єрами. Первомайський кар'єр – один з найбільших в Україні, його довжина сягає 3 тис. м, ширина – 2,5 тис. м, глибина – 470 м (проєктна глибина 650 м) (рис. 3). Ганнівський кар'єр (довжина 5250 м, ширина 1200 м, глибина 275 м) має проєктну продуктивність 10 млн т руди на рік. ГЗК здійснює повний технологічний цикл від видобутку залізної руди до виготовлення залізорудного концентрату (вміст заліза 66 %) і котунів (вміст заліза 60,3–63,5 %).

Переробний комплекс включає три дробильні фабрики, дві збагачувальні фабрики, два цехи виробництва котунів і ряд допоміжних цехів. На збагачувальних фабриках дроблена руда проходить три стадії подрібнення, збагачення на магнітних сепараторах, дешламацію і фільтрацію, в результаті чого отримують залізорудний концентрат із вмістом заліза 66 % (рис. 4). У цехах виробництва котунів отримують котуни із вмістом заліза 60,3–63,5 %. У 2020 р. вироблено 12 650 тис. т залізорудного концентрату і 6 500 тис. т котунів.

Рис. 3. Кар'єр залізорудного родовища Першотравневе (ПІВНГЗК) (фото автора, 2007 р.)

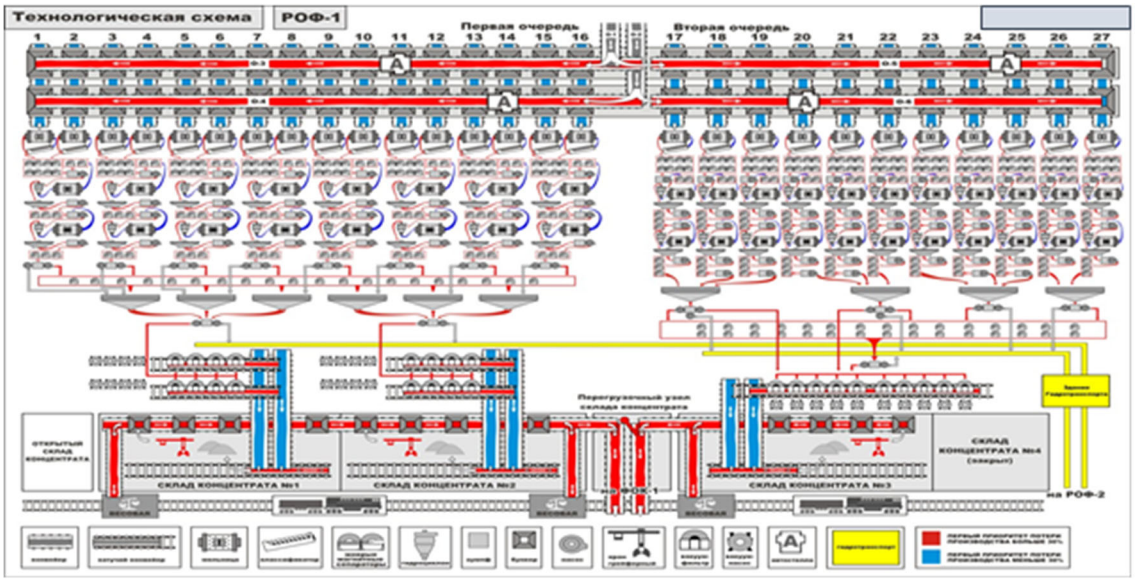


Рис. 4. ПІВНГЗК. Технологічна схема збагачувальної фабрики РЗФ-1 (публікується за дозволом ПРАТ ПІВНГЗК)

Південний ГЗК здійснює видобуток руди відкритим способом на Скелюватському родовищі з балансовими запасами магнетитових кварцитів 962,2 млн т, окиснених кварцитів – 53,6 млн т. Руда потрапляє на дробильні фабрики, а далі – на збагачувальні підприємства. Виробнича структура підприємства включає 2 дробильні фабрики, облаштовані 4 дробарками крупного дроблення і по 17 дробарок середнього і дрібного дроблення загальною проєктною потужністю 35 млн т/рік; агломераційну фабрику (з 2019 р. виробництво агломерату зупинено); 2 збагачувальні фабрики, які складаються з 20 секцій проєктною потужністю 17,1 млн т/рік концентрату. Технологічна схема збагачення включає три стадії подрібнення і чотири-п'ять стадій магнітної сепарації. Основним методом збагачення є магнітний у слабкому полі. У результаті з руди з масовою часткою загального заліза 35,01 %, заліза магнітного 27,33 % отримують концентрат з масовою часткою загального заліза 64,77–65,31 %. У 2019 р. на комбінаті було вироблено 12,343 млн т концентрату із вмістом заліза 64,77–65,31 % і 0,946 млн т агломератів із вмістом заліза 53,31–54,13 %.

ПАТ "Арселорміттал Кривий Ріг" ("АМКР") відкритим способом видобуває залізні руди на родовищах Валявкинське і Новокриворізьке, загальні запаси яких сягають 2,7 млрд т руди. Видобуток руди у 2019 р. становив: Новокриворізьке – 9 854 тис. т, Валявкинське – 13 423 тис. т. Гірничо-збагачувальний комплекс підприємства складається з добувного, дробильного і збагачувального виробництв. Дроблення руди відбувається на дробильних фабриках № 1 і 2, де вихідна руда розміром до 1200 мм послідовно дробиться до розміру шматків, що не перевищують 350 мм, 90 мм, 20 мм і не більші 12,5 % класу +20 мм. Збагачення руди здійснюється на рудозбагачувальних фабриках № 1 і 2 такими технологічними операціями, як три стадії подрібнення (мелення) і

класифікації, три стадії мокрої магнітної сепарації, дешламації, зневоднення. Готовим продуктом після стадії збагачення магнетитової руди є концентрат магнетитовий, в якому масова частка заліза загального повинна сягати 65,3 %.

Полтавський ГЗК з проектною потужністю 34 млн т руди щорічно працює на базі родовищ Лавриківського і Горішньоплавнівського, де у 2019 р. видобуток залізної руди становив 12 841 тис. т. Загальні запаси родовищ сягають 1 010 333 тис. т руди. Підприємство має повний технологічний цикл – від видобутку залізистих кварцитів із вмістом заліза загального в межах від 32 до 35 % до виробництва залізорудних котунів із вмістом заліза загального в межах від 62 до 65 %. Переробка руди, виробництво концентрату й котунів здійснюється на переробному комплексі, що включає дробильну та збагачувальну фабрики, а також цех виробництва котунів. Руди проходять такі стадії переробки: магнітне збагачення і флотаційна доводка концентрату. В результаті отримують флотаційний концентрат з масовою часткою заліза загального 67,2 %.

Крім того, на підприємстві за давальницькою схемою здійснюється переробка залізної руд, видобутої на Єристівському ГЗК.

Єристівський ГЗК розроблює Єристівське родовище, запаси якого перевищують 600 млн т руди, а ресурси – понад 1 млрд т. Передбачуваний об'єм видобутку сягає до 27–28 млн т руди на рік. Видобуток руди здійснюється відкритим способом. У 2019 р. тут було видобуто 11 521 тис. т залізної руди.

Інші підприємства (ПАТ "Криворізький залізорудний комбінат", ПАТ "Суха Балка", Запорізький залізорудний комбінат) відіграють невелику роль у видобутку залізних руд і сукупно становлять лише 7,5 % добувного сектору.

Дискусія і висновки

Залізні руди є традиційним видом гірничорудної сировини України, інвестиційна привабливість якого ґрунтується на значних запасах, багаторічному досвіді розробки, розвиненій інфраструктурі. Україна належать до провідних країн світу з видобутку залізних руд, і, вочевидь, і в подальшому буде зберігати свої позиції. В Україні існує розвинена інфраструктура видобувної промисловості, представлена потужними гірничо-збагачувальними комбінатами, які на довгі роки забезпечені значними запасами залізних руд. Безумовно, після закінчення військових дій обсяги видобутку залізних руд і виробництва магнетитових концентратів будуть значно збільшуватися.

Як свідчить аналіз МСБ залізних руд України, подальший розвиток гірничодобувної промисловості буде пов'язаний насамперед з існуючими підприємствами, хоча в країні відомо багато інших перспективних ділянок. Враховуючи значні терміни забезпеченості існуючих гірничорудних підприємств, незважаючи на певні проблеми, які існують, залучення нових об'єктів виглядає недоцільним, особливо з погляду на значну конкуренцію з боку ГЗК, які нині функціонують. Це ускладнює інвестування нових проєктів, які виглядатимуть неконкурентоспроможними порівняно з існуючими підприємствами. Тому майбутнім потенційним інвесторам можна рекомендувати вкладення коштів не в нові проєкти, а в ті, які давно розроблюються різними промислово-фінансовими об'єднаннями, групами, гірничо-з багачувальними комбінатами шляхом акціонування. Найпривабливішими у цьому сенсі є ГЗК групи "Метінвест".

Для успішного функціонування ГЗК галузі необхідно вирішення ряду питань, головними з яких є пошуки нових покладів багатих залізних руд, удосконалення процесів їх збагачення, розв'язання екологічних проблем, які супроводжують процес видобутку залізних руд, геолого-економічна переоцінка існуючих запасів, залучення інвестицій.

Перспективи подальшого розвитку у цьому напрямку полягають у прогнозуванні розвитку МСБ залізних руд України з урахуванням кон'юнктури світового ринку і прогнозної оцінки його потреб, а також у частині: ризиків руйнування і доступності запасів залізних руд для діючих підприємств; нових вимог до товарної продукції залізорудних підприємств в частині "декарбонізації", особливо тих, що експортують продукцію; недоступності земельних ділянок для приросту розвіданих запасів для відкритого способу видобування та відвалоутворення.

Список використаних джерел

Белевцев, Я. Н., & Белевцев, Р. Я. (1981). *Геологическое строение и железные руды Криворожского бассейна*. Наукова думка.

Белевцев, Я. Н., Епатко, Ю. М., & Веригин, М. И. и др. (1981). *Железорудные месторождения докембрия Украины и их прогнозная оценка*. Наукова думка.

Гурський, Д. С. (2008). *Концептуальні засади державної мінерально-сировинної політики щодо використання стратегічно важливих для економіки країни корисних копалин*. ЗУКЦ.

Гурський, Д. С., Єсипчук, К. Ю., & Калінін, В. І. та ін. (2006). *Металічні і неметалічні корисні копалини України. Т. 1. Металічні корисні копалини. Центр Європи.*

Закон України "Про внесення змін до Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року" (2021). http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/JF5OG00V.html

Зарицький, О. І., Лебідь, М. І., & Куліш, Є. О. та ін. (1994). Рудні ресурси чорної металургії. *Мінер. ресурси України,* 1, 10–13.

Кулиш, Е. А., & Плотников, А. В. (2005). *Геологические факторы экономической ценности железорудных месторождений*. Логос.

Кулиш, Е. А., Лебедь, Н. И., & Суходольский, К. А. (1971). *Минеральные ресурсы Украины. Кадастр мінеральних ресурсів Української РСР (рудна і нерудна сировина для чорної металургії)*. Наукова думка.

Михайлов, В. А. (2023[1]). Високоперспективні об'єкти мінерально-сировинної бази України. Ч. 1. Металічні корисні копалини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія,* 1(100), 73–85. http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.09

Михайлов, В. А. (2023[2]). *Стратегічні корисні копалини України та їх інвестиційна привабливість*. ВПЦ "Київський університет". http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf

Михайлов, В. А. (2024). Тенденції розвитку гірничорудної промисловості України у світовому контексті. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія,*1(104), 55–62.

Михайлов, В. А., Шевченко, В. І., & Огар, В. В. та ін. (2007). *Металічні корисні копалини України*. ВПЦ "Київський університет".

Михайлов, В., Шнюков, С., Коструба, А., Харитонова, Т., Григорєва, Х., & Ткалич, М. (2022). Правові аспекти переробки залізних руд Криворізького залізорудного басейну. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія,* 1(96), 64–75. http://doi.org /10.17721/1728-2713.96.

Мінеральні ресурси України. Щорічник. (2020). ДВНП "Геоінформ України". http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf

Рудько, Г. І., Плотников, О. В., & Радованов, С. В. (2013). *Геологія окислених кварцитів залізорудних родовищ Криворізького басейну*. Букрек.

Рудько, Г. І., Плотников, О. В., Курило, М. М., & Радованов, С. В. (2010). *Економічна геологія родовищ залізистих кварцитів*. Академпресса.

Рудько, Г. І., Плотніков, О. В., & Радованов, С. В. (2012). *Геолого-економічна оцінка окислених залізистих кварцитів в залізисто-кременистих формаціях докембрію Українського щита*. Букрек.

Рудько, Г., Курило, М., & Радованов, С. (2011). *Геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин*. АДЕФ-Україна.

Смірнов, О. Я., Євтєхов, Є. В., & Євтєхов, В. Д. (2010). Геологічна позиція і морфологія покладів гематитових кварцитів Валявкинського родовища Криворізького басейну. *Геолого-мінералогічний вісник Криворізького технічного університету*, 1–2 (23–24), 17–29.

Смірнов, О. Я., Євтєхов, Є. В., & Євтєхов, В. Д. (2012). Мінералогічна неоднорідність покладів гематитових кварцитів Криворізького басейну (на прикладі Валявкинського родовища). *Геолого-мінералогічний вісник Криворізького технічного університету*, 22–27. http://nbuv.gov.ua /j-pdf/vdugg_2012_20_14_6

Mineral Commodity Summaries (2016–2021). USGS. Electronic resource. https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf

Mykhailov, V. A., Hrinchenko, O. V., & Malyuk, B. I. (2022). Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine. Geological Society, London, Special Publications. 2022-03-28. *Journal article. P.* 267–287. https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133

Mykhailov, V., Malyuk, B., Bovsunivskyi, P., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Wellmer, F.-W., Horwath, Z., & Hollis, J. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. BRGM.

World Mining Data (2023). C. Reichl (Ed.) Vol. 38. Mineral Production. https://world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2023.pdf

References

Belevtsev, Ya. N., & Belevtsev, R. Ya. (1981). *Geological Structure and Iron Ores of Kryvyj Rig Basin*. Naukova dumka [in Russian].

Belevtsev, Ya. N., Epatko, Yu. M., & Verigin, M. I. et al. (1981). *Precambrian iron ore deposits of Ukraine and their forecast assessment*. Naukova dumka [in Russian].

Gurskiy, D. S. (2008). *Conceptual Principles of the State Mineral Resources Policy on the Use of Strategically Important Minerals for the Country's Economy*. ZUKC [in Ukrainian].

Gurskiy, D. S., Esipchuk, K. Yu., & Kalinin, V. I. et al. (2006). *Metallic and Non-Metallic Minerals of Ukraine*. Vol. I. Metallic Minerals. Center of Europe [in Ukrainian].

Kulish, E. A., & Plotnikov, A. V. (2005). *Geological Factors of Economic Value of Iron-Ore Deposits*. Logos [in Russian].

Kulish, E. A., Lebed, N. I., & Sukhodolskiy, K. A. (1971). *Mineral Resources of Ukraine. Cadastre of Mineral Resources of the Ukrainian SSR (Ore and Non-Ore Raw Materials for Ferrous Metallurgy)*. Naukova Dumka [in Russian].

Mineral Commodity Summaries (2016–2021). USGS. Electronic resource. https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf

Mineral Resources of Ukraine (2020). Geoinform of Ukraine. http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf (accessed 15.12.22) [in Ukrainian].

Mykhailov, V. A. (2023[1]). Highly prospective objects of the mineral and raw material base of Ukraine. Part 1. Metallic minerals. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(100), 73–85. http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.09 [in Ukrainian].

Mykhailov, V. A. (2023[2]). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. Kyiv University [in Ukrainian]. http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf

Mykhailov, V. A. (2024). Development trends of the mining industry of Ukraine in the global context. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(104), 55–62 [in Ukrainian].

Mykhailov, V. A., Hrinchenko, O. V., & Malyuk, B. I. (2022). Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine. Geological Society, London, Special Publications. 2022-03-28 | Journal article. P. 267–287. https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133

Mykhailov, V. A., Shevchenko, V. I., & Ogar, V. V. et al. (2007). *Metallic Minerals of Ukraine*. Kyiv University Publishing [in Ukrainian].

Mykhailov, V., Shnyukov, S., Kostruba, A., Kharitonova, T., Grigoreva, H., & Tkalych, M. (2022). Legal aspects of processing of iron ores of the Kryvyj Rig iron ore basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(96), 64–75 [in Ukrainian]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.10

Mykhailov, V., Malyuk, B., Bovsunivskyi, P., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Wellmer, F.-W., Horwath, Z., & Hollis, J. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. BRGM.

Rudko, G. I., Plotnikov, O. V., & Radovanov, S. V. (2012). *Geological and Economic Assessment of Oxidized Iron Quartzites in Iron-Siliceous Formations of Precambrian of Ukrainian Shield*. Bookrek [in Ukrainian].

Rudko, G. I., Plotnikov, O. V., & Radovanov, S. V. (2013). *Geology of Oxidized Quartzites of Iron Ore Deposits of Kryvyj Rig Basin*. Bookrek [in Ukrainian].

Rudko, G. I., Plotnikov, O. V., Kurylo, M. M., & Radovanov, S. V. (2010). *Economic Geology of Iron Quartzite Deposits*. Academpress [in Ukrainian].

Rudko, G., Kurylo, M., & Radovanov, S. (2011). *Geological and Economic Assessment of Mineral Deposits*. ADEF-Ukraine [in Ukrainian].

Smirnov, O. Ya., Evtekhov, E. V., & Evtekhov, V. D. (2010). Geological position and morphology of hematite quartzite deposits of Valyavkinske deposit of Kryvyj Rig Basin. *Geological and Mineralogical Bulletin of Kryvyj Rig Technical University,* 1–2(23–24),17–29 [in Ukrainian].

Smirnov, O. Ya., Evtekhov, E. V., & Evtekhov, V. D. (2012). Mineralogical heterogeneity of hematite quartzite deposits in Kryvyj Rig Basin (on the example of Valyavkinske deposit). *Geological and Mineralogical Bulletin of Kryvyi Rih Technical University,* 3–4(26–27), 22–27 [in Ukrainian].

The Law of Ukraine on Amendments to the National Program for the Development of the Mineral and Raw Material Base of Ukraine for the Period Until 2030 (2021) [in Ukrainian]. http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf /link1/JF5OG00V.html

World Mining Data (2023). C. Reichl (Ed.) Vol. 38. Mineral Production. https://world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2023.pdf

Zarytskiy, O. I., Lebid, M. I., & Kulish, E. O. et al. (1994). Ore resources of ferrous metallurgy. *Mineral Resources of Ukraine*, 1, 10–13 [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 15.05.24
Прорецензовано / Revised: 03.07.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Volodymyr MYKHAILOV, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-1837-9739
e-mail: vladvam@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

IRON ORE MINING INDUSTRY OF UKRAINE IN A GLOBAL CONTEXT

The structure of the iron ore mining industry of Ukraine, its role and significance in the world production of iron ores is considered. It is shown that the mining plants are one of the main budget-forming enterprises of Ukraine. An assessment of the state and forecasting of the development of the mineral and raw material base of iron ores of Ukraine was carried out, taking into account the state of the world market and a forecast assessment of its needs. The global trends in the development of the iron ore mining industry were considered, and it was shown that the general global trend over the last pre-war 5 years (2017–2021) was a gradual increase in iron ore production. A brief description of the iron ore basins of Ukraine is given. The most important mining enterprises of Ukraine are characterized. It is shown that iron ore is a traditional type of mining raw material of Ukraine, the investment attractiveness of which is based on significant reserves, many years of development experience, and developed infrastructure.

Keywords: ***mineral and raw material base, deposit, iron ore, mining and beneficiation plant, investments***

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 553.043
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.10

Владислав ЛУКОМСЬКИЙ, асп.
ORCID ID:0000-0003-2282-3254
e-mail: lukoma770@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Марія КУРИЛО, д-р геол. наук, доц.
ORCID ID:0000-0002-1411-2754
e-mail: marikurylo@meta.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПАРАМЕТРИ КОНДИЦІЙ ДЛЯ ПІДРАХУНКУ ЗАПАСІВ РОДОВИЩ БУДІВЕЛЬНОГО КАМЕНЮ В РЕГІОНАХ ПОШИРЕННЯ ЛЬОДОВИКОВИХ ВІДКЛАДІВ

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

Об'єктами дослідження є родовища кристалічних порід, які розробляються для виробництва каменю будівельного та щебеневої сировини і локалізовані в межах поширення гляціальних та флювіогляціальних відкладів.

У роботі систематизовано параметри кондицій для підрахунку запасів для родовищ будівельного каменю. Визначено випадки оцінки основної, супутньої та спільно залягаючої корисної копалини. Традиційно параметри кондицій для таких родовищ враховують вимоги до якості основної корисної копалини, глибини відпрацювання запасів та товщини розкривних порід. Встановлено, що для більшості об'єктів використовують такі параметри для підрахунку запасів: 1) стратиграфічне положення корисної копалини; 2) параметри якості корисної копалини, де головними є фізико-механічні властивості, що визначають придатність сировини для виробництва щебеню будівельного або каменю бутового; 3) максимальна товщина розкривних порід становить від 1 до 28,5 м; 4) встановлення охоронних ціликів, вибухонебезпечних зон тощо; 5) максимальна глибина розробки і горизонт підрахунку запасів. Максимальна сумарна питома активність природних радіонуклідів у пробах корисної копалини не повинна перевищувати значення в 370 Бк/кг. Оцінюються також продукти дроблення граніту на фракційний щебінь, які представлені відсівом і мають відповідати вимогам стандарту "Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови". Для таких родовищ корисна копалина використовується для виготовлення щебеню фракції понад 5 до 10 мм, понад 10 до 20 мм, понад 20 до 40 мм, понад 40 до 70 мм та суміш фракцій понад 5 до 20 мм, понад 0 до 40 мм, понад 0 до 70 мм.

Розглянуто доцільність комплексного освоєння родовищ будівельного каменю та щебеневої сировини. Зокрема, запропоновано розглядати розкривні породи, представлені відкладами льодовикового походження, як супутні корисні копалини, які мають напрями використання сировини у будівельній індустрії та ландшафтному дизайні. Розраховано граничний коефіцієнт розкриву для родовищ, які вивчаються.

Визначено залежність граничного коефіцієнта розкриву від зміни собівартості видобутку корисної копалини та розкривних робіт.

Ключові слова: ***параметри кондицій, підрахунок запасів, запаси будівельного каменю, льодовикові відклади.***

Вступ

Актуальність роботи пов'язана з можливістю ефективного комплексного відпрацювання родовищ гранітів, які розташовані в межах поширення льодовикових відкладів. Ефективність комплексного освоєння стосується використання розробки розкривних порід як будівельної сировини та матеріалу для ландшафтного дизайну (Вимоги до комплексного…, 1997). Доцільність такого освоєння має визначатися в результаті геолого-економічної оцінки, де окремим варіантом буде передбачено врахування розкриву як супутньої або спільно залягаючої корисної копалини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальні засади геолого-економічної оцінки та підрахунку запасів для родовищ щебеневої сировини розглядаються у вітчизняних нормативних документах, зокрема Класифікації запасів і ресурсів Державного фонду надр (Про затвердження Класифікації…,1997) та Інструкції із застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ будівельного й облицювального каменю (Про затвердження Інструкції…, 2003). Кількісна оцінка запасів родовищ щебеневої сировини періодично подається у довідкових виданнях Державної служби геології та надр України (Мінеральні ресурси…, 2020).

Традиційно об'єктами оцінювання є запаси і ресурси кристалічних порід, які за фізико-механічними властивостями відповідають вимогам будівельної індустрії до виробництва щебеневої товарної продукції. Також оцінюються і відходи такого виробництва, які зазвичай класифікуються як супутні корисні копалини та компоненти (рис. 1).

Здебільшого для вітчизняних родовищ щебеневої сировини оцінюється саме основна корисна копалина, яка визначає не лише промислове значення, але й встановлює базовий напрям використання сировини. У меншій кількості випадків оцінюють і супутні корисні копалини, якими зазвичай є вивітрені різновиди кристалічних порід, а також відходи переробки основної корисної копалини. Спільно залягаючі корисні копалини оцінюються в дуже рідкісних випадках, і найчастіше притаманними ГЕО інших типів родовищ.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. У даній роботі досліджуються родовища щебеневої сировини, для яких можливе і доцільне комплексне використання корисних копалин, тобто видобуток усіх корисних копалин родовища та їх промислове використання, а також використання відходів, що утворюються у процесі видобутку і переробки мінеральної сировини відповідно до Класифікації запасів і ресурсів державного фонду надр. Комплексне використання об'єктів можливе за рахунок використання саме спільно залягаючих корисних копалин, які зосереджені в межах розкривних порід – гляціальних та флювіогляціальних відкладів. За нормативним визначенням це корисні копалини, що утворюють у розкривних і вмісних породах самостійні поклади, селективний видобуток і вилучення яких технологічно можливі та економічно доцільні у процесі видобутку основних корисних копалин (Про затвердження Класифікації…, 1997).

Формулювання цілей статті. Завданням даного дослідження є узагальнення і систематизація параметрів кондицій для родовищ грантів, які розташовані в межах поширення льодовикових відкладів, для яких передбачено комплексне використання корисних копалин.

Рис. 1. Систематизація об'єктів ГЕО для родовищ щебеневої сировини відповідно до нормативних документів

Результати

Об'єктами даного дослідження є родовища кристалічних порід (будівельного каменю), які розташовані в межах поширення льодовикових відкладів, зокрема Соснівське, Богуславське та Кощіївське родовища гранітів, а також родовище лабрадориту "Синій Камінь". За кількістю запасів названі родовища природного каменю належать до середніх, для яких запаси категорій А + В + C_1 оцінені у кількості 10 000–30 000 тис. м^3, а також до малих родовищ, для яких запаси промислових категорій оцінюються до 10 000 тис. м^3.

Для узагальнення і систематизації параметрів кондицій для родовищ гранітів, які розташовані в межах поширення льодовикових відкладів, використано вибірку родовищ, які мають достатній ступінь геологічного вивчення і промислового освоєння. Всі об'єкти мають підраховані промислові запаси (балансові) основної та супутніх корисних копалин (без оцінки промислового значення розкривних порід).

Врахування розкривних порід як супутньої корисної копалини передбачає розробку відповідних кондицій на мінеральну сировину, які визначені як "сукупність граничних вимог до якості та кількості мінеральної сировини в надрах, гірничо-геологічних умов залягання, гірничотехнічних та інших умов розробки продуктивних покладів, дотримання яких під час підрахунку забезпечує найбільш повний й економічно ефективний видобуток і використання наявних запасів та ресурсів корисних копалин" (Про затвердження Інструкції…, 2003).

Власне для оконтурення промислових запасів встановлюють параметри кондицій, які є граничними абсолютними (мінімальними, максимальними) значеннями показників кондицій, які встановлюються для проби, інтервалу, розвідувального перетину, видобувного уступу чи підрахункового блоку продуктивного покладу на підставі техніко-економічних розрахунків, чинних стандартів і технічних умов, технічних завдань користувачів надр, досвіду геологорозвідувальних робіт та експлуатації родовищ (Про затвердження Інструкції…, 2003).

Для підрахунку запасів у 90 % випадків використано такі параметри:

1. Стратиграфічна приуроченість корисної копалини – нижньопротерозойські незмінені граніти та порушені вивітрюванням граніти уманського комплексу.

2. Параметри якості корисної копалини:

- фізико-механічні властивості, що визначають придатність сировини;
- для виробництва щебеню будівельного відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2.7-75-98 "Щебінь і гравій щільний природній для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови";
- для виробництва каменю бутового відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2.7-241:2010. "Камінь бутовий. Технічні умови";
- продукти дроблення граніту на фракційний щебінь, які представлені відсівом, відповідають вимогам ДСТУ Б.В.2.7-210:2010 "Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови", і можуть використовуватись як товарна продукція;
- для виробництва облицювальних виробів із блоків природного каменю відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2.7-59-97 "Блоки із природного каменю для виробництва облицювальних виробів";
- корисна копалина, придатна для виготовлення щебеню щільного: фракції понад 5 до 10 мм вкл., понад 10 до 20 мм вкл., понад 20 до 40 мм вкл., понад 40 до 70 мм вкл. та суміш фракцій понад 5 до 20 мм вкл., понад 0 до 40 мм вкл., понад 0 до 70 мм вкл.;
- корисна копалина придатна для виготовлення каменю бутового;
- максимальна сумарна питома активність природних радіонуклідів у пробах корисної копалини не повинна перевищувати значення в 370 Бк/кг відповідно до ДБН В.1.4-1.01-97 "Система норм і правил зниження рівня іонізуючих випромінювань природних радіонуклідів в будівництві. Регламентовані радіаційні параметри. Допустимі рівні".

3. Граничні вимоги до гірничо-геологічних умов розробки:

- віднесення до розкривних порід окремих літологічних різновидів – ґрунтово-рослинний шар, пісок, жорства та вивітрені граніти;
- максимальна товщина розкривних порід становить від 1 до 28,5 м.

4. Встановлення охоронних ціликів, вибухонебезпечних зон та ін.

5. Максимальна глибина розробки і горизонт підрахунку запасів.

На рис. 2–5 наведено приклади параметрів кондицій для типових родовищ щебеневої сировини Київської області.

Соснівське родовище гранітів

• 1. Корисна копалина - незмінені та порушені вивітрюванням гранітоїди фастівського комплексу нижнього протерозою;

• 2. Фізико-механічні властивості корисної копалини, які визначають придатність для виробництва щебеню будівельного, для виробництва каменю бутового та продуктів дроблення граніту на фракційний щебінь, які представлені відсівом;

• 3. Горизонт підрахунку запасів +76,0 м, у контурі кар'єру, обґрунтованого робочим проектом.

• 4. За рівнем природної радіоактивності граніти повинні відповідати вимогам НРБУ 76.

Рис. 2. Параметри для підрахунку запасів Соснівського родовища

Богуславське родовище гранітів

• 1. Корисна копалина – нижньопротерозойські незмінені граніти та порушені вивітрюванням граніти у манського комплексу;

• 2. Фізико-механічні властивості корисної копалини, які визначають придатність для виробництва щебеню будівельного, для виробництва каменю бутового та продуктів дроблення граніту на фракційний щебінь, які представлені відсівом;

• 3. Корисна копалина придатна для виготовлення щебню щільного: фракції понад 5 до 10 мм вкл., понад 10 до 20 мм вкл., понад 20 до 40 мм вкл., понад 40 до 70 мм вкл. та суміш фракцій понад 5 до 20 мм вкл., понад 0 до 40 мм вкл., понад 0 до 70 мм вкл.;

• 4. Корисна копалина придатна для виготовлення каменю бутового;

• 5. До розкривних порід на родовищі віднести ґрунтово-рослинний шар, пісок, жорству та вивітрені граніти;

• 6. Максимальна потужність розкривних порід становить до 28,5 м;

• 7. Підрахунок запасів виконати в контурі проектного кар'єру відповідно до проекту розробки родовища, до відмітки +33,0 м;

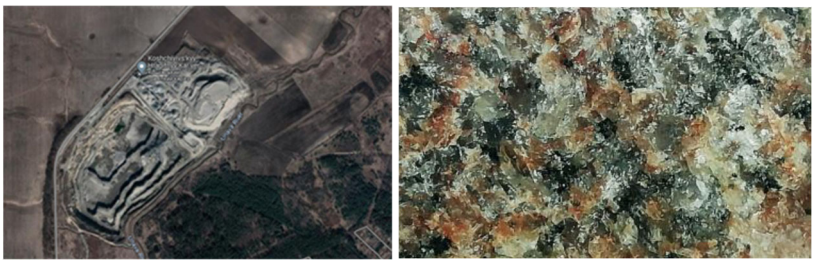
• 8. Максимальна сумарна питома активність природних радіонуклідів відповідно до ДБН В.1.4-1.01-97;

• 9. Охоронні цілики навколо транспортних шляхів;

• 10. Охоронний цілик 100,0 м р. Рось;

• 11. Вибухобезпечна зону в 300,0 м від найближчих забудівель.

Рис. 3. Параметри для підрахунку запасів Богуславського родовища



Кощіївське родовище гранітів

• 1. Корисна копалина - нижньопротерозойські незмінені граніти та порушені вивітрюванням граніти;

• 2. Фізико-механічні властивості корисної копалини, які визначають придатність для виробництва щебеню будівельного, для виробництва каменю бутового та продуктів дроблення граніту на фракційний щебінь, які представлені відсівом;

• 3. Підрахунок запасів виконати в контурі кар'єра до горизонту з абсолютною відміткою +45,0 м.

• 4. За рівнем природної радіоактивності граніти повинні відповідати вимогам НРБУ 76.

Рис. 4. Параметри для підрахунку запасів Кощіївського родовища

Родовище лабродариту "Синій Камінь"

- 1. Корисна копалина - нижньопротерозойські незмінені граніти та порушені вивітрюванням граніти;
- 2. Фізико-механічні властивості корисної копалини, які визначають придатність для виробництва блочного ДСТУ БВ.2.7-59-97 "Блоки із природного каменю для виробництва облицювальних виробів. Загальні технічні умови". Фізико-механічні властивості каменю: Об'ємна вага: 2660-2740 кг/м^3 , водопоглинання матеріалу: 0,02-0,06 %, межа міцності на стиск: 125-168 МРа стійкість до стирання: 0,09-0,16 г/см^2;
- 3. Корисна копалина придатна для виготовлення блоків із природного каменю для виробництва облицювальних виробів.
- 4. До розкривних порід на родовищі віднести ґрунтово-рослинний шар, пісок, жорству та вивітрені граніти
- 5. За рівнем природної радіоактивності граніти відповідають вимогам НРБУ 76.

Рис. 5. Параметри для підрахунку запасів родовища "Синій Камінь"

Як бачимо, у переліку параметрів відсутні показники, які характеризують можливість використання гляціальних та флювіогляцальних порід, що складають істотну частину розкриву даних родовищ. Для оцінки використання цих порід як супутньої корисної копалини пропонується врахувати їх геологічні особливості, оскільки у північних регіонах України виділяють як льодовикові, так і флювіогляціальні відклади. Льодовикові відклади, або тілли, складені з несортованих валунів та гальки різного складу та віку в дрібнозернистій глинистій муловій матриці. Товщина відкладів – від 0,5 м до понад 18 м. Ці відклади, які складають істотну частину розкривних порід, можуть також розглядатись як супутні або спільно залягаючі корисні копалини, які можуть або вже використовуються в будівельній індустрії та в ландшафтному дизайні.

Оскільки (Про затвердження Положення…, 2006) використання розкриву змінює ефективність розробки основної корисної копалини, то в даному випадку доречним є застосування граничного коефіцієнта розкриву ($k_{гр}$), який характеризує питомий (на одиницю корисної копалини) максимальний об'єм розкривних порід, що переміщуються, за якого витрати ($C_в'$) на видобуток одиниці корисної копалини відкритим способом не перевищують аналогічних витрат ($C_п$) при підземному способі, тобто $C_в \leq C_п$. Величина $C_в'$ визначається за формулою:

$$C_в' = C_в + k_т \cdot C_р \ ,$$

де: $C_в$ – витрати на видобуток 1 т корисної копалини без урахування витрат на розкривні роботи, грн; $C_р$ – витрати на розробку 1 м^3 розкривних порід, грн; $k_т$ – поточний коефіцієнт розкриву, м^3/т.

Значення коефіцієнтів розкриву є важливими показниками відкритих розробок. Вони служать для визначення економічно ефективних границь відкритих гірничих робіт і граничної глибини кар'єрів при розробці похилих і крутих покладів, що залягають на значній глибині, а також для планування продуктивності кар'єру і собівартості корисної копалини.

Для перелічених об'єктів було встановлено розрахункове значення граничного коефіцієнта розкриву, яке лежить у межах 3–5 м^3/м^3 і залежить від собівартості робіт, глибини розробки та інших факторів. На рис. 6. наведено залежність граничного коефіцієнта розкриву від зміни собівартості видобутку корисної копалини та розкривних робіт.

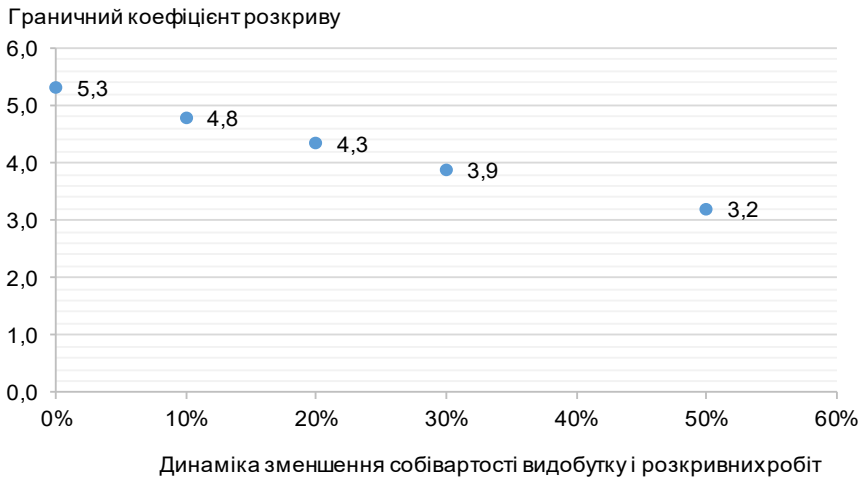


Рис. 6. Залежність граничного коефіцієнта розкриву від зміни собівартості видобутку корисної копалини та розкривних робіт

Дискусія і висновки

Отже, при комплексному освоєнні родовищ гранітів, розташованих у межах поширення льодовикових відкладів, має проводитись геолого-економічна оцінка, яка передбачає хоча б один варіант альтернативного використання розкривних порід як супутньої або спільно залягаючої корисної копалини (Про затвердження Класифікації…, 1997). Параметрами кондицій, які додатково до традиційних параметрів якості та кількості запасів рекомендуються до використання, є граничний коефіцієнт розкриву та мінімальні/максимальні розміри валунів і уламків у породах гляціального і флювіогляціального походження, що можуть використовуватись як будівельна сировина та матеріал для ландшафтного дизайну.

Внесок авторів: Владислав Лукомський – методологія, збір та аналіз даних, підготовка ілюстрації написання (оригінальна чернетка); Марія Курило – концептуалізація, методологія, формальний аналіз підготовка ілюстрацій, написання (перегляд та редагування).

Список використаних джерел

Вимоги до комплексного вивчення родовищ і підрахунку запасів супутніх корисних копалин і компонентів та відходів гірничого виробництва. (1997). Державна комісія України по запасах корисних копалин, ст. 17.

Мінеральні ресурси України. (2020). Державне науково-виробниче підприємство "Державний інформаційний геологічний фонд України".

Про затвердження Інструкції із застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ будівельного й облицювального каменю. (2003). *Офіційний вісник України*, 6, 205. Стаття 261, код акта 24374/2003.

Про затвердження Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр. (1997). *Офіційний вісник України,* 19, 104. Код акта 700/1997. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/432-97-%D0%BF#Text

Про затвердження Положення про порядок розробки та обґрунтування кондицій на мінеральну сировину для підрахунку запасів твердих корисних копалин у надрах. (2006). *Офіційний вісник України*, 5, 137. Стаття 246, код акта 35044/2006.

References

Mineral resources of Ukraine. (2020). State Scientific and Production Enterprise "State Information Geological Fund of Ukraine" [in Ukrainian].

On Approval of the Classification of Mineral Reserves and Resources of the State Fund of Subsoil. (1997). *Official Edition of Ukraine,* 19, 104. Act Code 700/1997 [in Ukrainian]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/432-97-%D0%BF#Text

On Approval of the Instruction on the Application of the Classification of Mineral Reserves and Resources of the State Fund of Subsoil to the Deposits of Construction and Facing Stone. (2003). *Official Edition of Ukraine,* 6, 205. Article 261, Act Code 24374/2003 [in Ukrainian].

On Approval of the Regulation on the Procedure for Development and Substantiation of Mineral Resource Conditions for Estimation of Subsoil Reserves. (2006). *Official Edition of Ukraine,* 5, 137. Article 246, Act Code 35044/2006 [in Ukrainian].

Requirements for the comprehensive study of deposits and calculation of reserves of associated minerals and components and wastes of mining production. (1997). State Commission of Ukraine on Mineral Resources, p. 17 [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 14.06.24
Прорецензовано / Revised: 25.09.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Vladyslav LUKOMSKYI, PhD student
ORCID ID:0000-0003-2282-3254
e-mail: lukoma770@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Mariia KURYLO, DSc (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID:0000-0002-1411-2754
e-mail: marikurylo@meta.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

CUT-OFF PARAMETRES FOR RESERVES CALCULATION OF CONSTRUCTION STONE DEPOSITS WITHIN THE DISTRIBUTION OF GLACIAL SEDIMENTS

The study objects are crystalline rocks deposits, which are developed for the production of construction and crushed stone, and are localized within the distribution of glacial and fluvioglacial deposits. Traditionally, the cut-off parameters for such deposits mainly take into account the requirements for the quality of the main mineral, the mining depth and the overburden thickness.

The study systematizes the cut-off parameters for reserves calculating for deposits of construction and crushed stone. The cases of assessment of the main mineral, co-occurring and by-product minerals have been determined. Traditionally, the cut-off parameters for such deposits mainly take into account the requirements for the quality of the main mineral, mining depth and the overburden thickness. It was defined that the following parameters are used for the reserves calculation for most objects: 1) stratigraphic definitions of the mineral – mineral – Lower Proterozoic unaltered granites and weathered granites of the Uman complex or other crystalline rocks; 2) mineral quality parameters, where the main physical and mechanical properties determine the suitability of raw materials for the production of crush stone and for the production of rubble stone; 3) the maximum thickness of overburden is from 1 to 28.5 m; 4) defining security cells, explosive zones, etc.; 5) the maximum mining depth and horizon of reserve calculation. The maximum total specific activity of natural radionuclides in mineral samples should not exceed the value of 370 Bq/kg. The products of crushing granite into fractional crushed stone, which are represented by screening, are also evaluated and must meet the requirements of the standard "Sand from screenings of crushing igneous rocks for construction works. Specifications".

This study examines the effectiveness of comprehensive development of construction and crushed stone deposits. In particular, it is proposed to consider overburden rocks, which are represented by deposits of glacial origin, as accompanying minerals, which have the directions of using raw materials in the construction industry and landscape design. The limit coefficient of overburden for the studied deposits is calculated.

The dependence of the limit coefficient of overburden on the change in the cost of mineral extraction and overburden work is determined.

K e y w o r d s : ***cut-off parameters, reserves calculation, reserves of construction and crush stones, glacial deposits.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

УДК 553.048
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.11

Микола БУРЛУЦЬКИЙ, канд. геол. наук
ORCID ID: 0009-0000-6718-3006
e-mail: Nikolay2205@i.ua
Державна служба геології та надр України, Київ, Україна

Станіслав ЛИТВИНЮК, канд. геол. наук
ORCID ID: 0000-0003-3763-2100
e-mail: lytvyniuksf@gmail.com
Державна комісія України по запасах корисних копалин, Київ, Україна

ГЕРМАНІЙ ЯК ЕЛЕМЕНТ КРИТИЧНОЇ СИРОВИНИ. БУРОВУГІЛЬНІ РОДОВИЩА ЗАКАРПАТТЯ ЯК ДЖЕРЕЛО ДЛЯ ОТРИМАННЯ ГЕРМАНІЮ В УКРАЇНІ

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

Визначено поняття критичної сировини, з врахуванням визначень, що застосовуються у США та Європейському Союзі. Надано основні етапи становлення нормативної бази та вимоги США, ЄС щодо критичної сировини. Розглянуто хронологію щодо зміни кількості корисних копалин, які є складовою частиною критичної мінеральної сировини.

Україна є державою з потужною мінерально-сировинною базою, багатства надр якої зумовлені особливостями геологічної будови її території. Україна володіє потужним ресурсним потенціалом і може стати одним із провідних світових виробників деяких видів корисних копалин, у тому числі такої важливої сировини, як берилій, германій та графіт. У нашій державі наявні близько 22 елементів корисних копалин, які належать до критичних і містяться в переліку критичних для ЄС.

Проведено аналіз та перспективи використання різних методів та сучасних технологій вилучення германію як одного з елементів критичної сировини. Розглянуто можливість щодо використання сучасних методів вилучення в Україні, зокрема на прикладі буровугільних родовищ Закарпаття.

В Україні саме буровугільні родовища Закарпаття мають потенціал стати важливим джерелом для видобутку рідкісних (рідкоземельних) елементів, у тому числі і германію. Опрацьовано можливість залучення сучасних світових технологій, які б сприяли видобутку бурого вугілля в Закарпатті з дотриманням усіх існуючих екологічних та соціально-екологічних вимог чинного законодавства.

Асоціація германію з рідкісними (рідкоземельними) елементами у цих родовищах може підвищити економічну цінність їх комплексного використання, оскільки існують закордонні технології, що дають змогу одночасно вилучати кілька критичних елементів з одного джерела.

Пропонується впровадження технологій вилуговування та флотації для підвищення ефективності видобутку. Це сприятиме економічному зростанню регіону та відповідатиме світовим вимогам щодо критичної сировини.

Вказано на необхідність запровадження в Україні Стратегії видобутку рідкоземельних та рідкісних металів для покращення економічної ситуації в гірничодобувній промисловості. А саме, необхідності комплексного відпрацювання родовищ бурого вугілля, з його використанням як палива, так як джерела рідкоземельних металів, необхідних для сучасних технологій у промисловості.

Ключові слова: ***критична мінеральна сировина, германій, буровугільні родовища, рідкоземельні та рідкісні метали, вилучення германію.***

Вступ

Останнім часом актуального значення у світі набувають проблеми сталого економічного розвитку, які безпосередньо пов'язані з різними причинами. Не останню роль у розв'язанні цієї проблеми відіграє можливість доступу країн до мінеральної сировини, передусім до тієї, яка має стратегічне значення.

У 2024 р. набрав чинності Закон ЄС про критичну мінеральну сировину (далі – КМС), спрямований на забезпечення диверсифікованого, безпечного та сталого постачання важливих сировинних матеріалів для промисловості ЄС.

Гарантований доступ до них є необхідним для стратегічних секторів, включаючи зелені технології, цифровізацію, оборонну й аерокосмічну галузі. Зазначений Закон зміцнює внутрішні потужності та ланцюжки постачання критично важливих сировинних матеріалів у ЄС, продовжуючи при цьому зусилля з їх диверсифікації.

У кожній з країн поняття КМС визначаються виходячи з вимог національного законодавства, умов кон'юнктури ринку, галузевої методики оцінки, можливості заміни на підставі ідентичності їх властивостей, відповідністю технологіям чистої енергії і т. ін.

Методологія визначення поняття КМС почали розробляти ще у 2008 р. у США. Вона побудована на трьох ознаках: 1) можливість заміщення іншим видом сировини; 2) функціональна незамінність; 3) ризик поставок.

Це фактично ті маркери, які дають змогу ту чи іншу корисну копалину відносити до переліку КМС (Баряцька, 2020).

Базові поняття та переліки КМС змінювалися у часі та були пов'язані з істотними змінами геополітичних і технологічних обставин. Розвинені країни мають різні підходи щодо формування переліку КМС, але по всьому світу головним її "споживачем" є "зелені" енергетичні технології (атомна, сонячна, вітрова та водна енергетика) та зростаюче виробництво електричних транспортних засобів.

Так, Міністерство енергетики США в липні 2023 р. видало звіт з оцінки КМС (Critical Materials Assessment, 2023). У звіті зазначається, що протягом понад десяти років Міністерство фінансувало фундаментальні та прикладні дослідження та розробки науково-дослідних робіт, пов'язаних з критично важливими матеріалами, щоб вирішити науково-технічні проблеми, які лежать в основі вразливості ланцюга постачання. Ці інвестиції стали можливими завдяки першій стратегії щодо КМС у 2010 р.

Оцінка критичних матеріалів 2023 р. дала змогу Міністерству енергетики США визначити пріоритети для інвестицій через дослідження, розробку та впровадження для критичних матеріалів, продовжуючи прогрес у науково-технічних інноваціях у поєднанні з розширеним фокусом на зниженні ризиків і розширенні технологій комерціалізації для створення та трансформації внутрішніх ланцюгів постачання.

У ЄС питання КМС, зокрема германію, також розглядається в контексті переходу до зеленої економіки, де цей елемент відіграє важливу роль у виробництві сонячних панелей та інших технологій. Європейська Комісія починаючі з 2011 р. складає та систематично переглядає свій перелік CRM (Mykhailov et al., 2023).

У 2017 р. було розроблено директивний документ, який містить керівні принципи визначення та методику оцінки КМС для ЄС. Відповідно до цього методичного документу у 2023 р. розроблений та опублікований фінальний звіт з дослідження КМС для ЄС (Guidelines, 2017). Того ж року вийшов документ Європейської Комісії (Methodology…, 2017). Цей документ включає критерії, підходи і методології для визначення критичних матеріалів, які мають життєве важливе значення для індустрій ЄС, з урахуванням економічної значущості та ризику постачання. Документ підкреслює важливість стійкого постачання германію та інших критичних елементів, оскільки їх відсутність може загальмувати розробку стратегічних технологій і цифрового майбутнього Європи.

На основі даних ЄС про переліки КМС понад 10 років зберігається стійка тенденція до розширення переліку КМС Європейського Союзу, який за цей час збільшився з 16 до 34. Загалом переліки КМС є досить показовими з погляду розвитку (або стимулювання) певних напрямів економіки та промисловості для даного регіону (Grohol et al., 2023).

Україна є державою з потужною мінерально-сировинною базою, багатства надр якої зумовлені особливостями геологічної будови її території. Водночас наша країна є одним із провідних світових виробників деяких видів корисних копалин, у тому числі такої важливої сировини, як марганець, титан і графіт. Хоча переліки КМС США, ЄС і України мають досить багато спільних видів сировини, український перелік має суттєві відмінності (наприклад, має 8 власних видів). Нині наші стратегічні корисні копалини більш подібні до переліку КМС США, ніж ЄС, що є досить нелогічним. Це може бути пов'язане не лише з різним розвитком економіки та промисловості, але й з методиками визначення критичності (Литвинюк, & Баряцька, 2024).

У нашій державі наявні близько 22 критичних корисних копалин, що містяться, зокрема, в переліку критичних для ЄС (Портфоліо…, 2023). У липні 2021 р. Україна та Європейський Союз уклали Меморандум про стратегічне партнерство щодо сировинних ресурсів. Крім того, у 2024 р. Україна стала членом Minerals Security Partnership (MSP) Forum. Завданням цього членства є налагодження партнерства з країнами, багатими на ресурси, і країнами з високим попитом на ці ресурси, для вивчення взаємовигідних проєктів. Проте в Україні поняття "критична мінеральна сировина" або "критичні корисні копалини" до цього часу законодавством не визначено.

Метою роботи є аналіз та перспективи використання різних методів і сучасних технологій для вилучення германію як одного з елементів критичної сировини.

В Україні саме буровугільні родовища Закарпаття мають ресурсний потенціал стати важливим джерелом для видобутку рідкісних (рідкоземельних) елементів, зокрема і германію. Асоціація германію з рідкісними (рідкоземельними) елементами у родовищах такого геолого-промислового типу може підвищити їх економічну цінність та комплексність використання із застосуванням сучасних технологій.

Комплексна розробка зазначених родовищ включає два напрями: використання бурого вугілля як палива та вилучення цінних компонентів (германій та ін.) як з вугільної маси, так і з вугільної золи та летючих золовиносів.

Пропонується впровадження технологій вилуговування та флотації для підвищення ефективності видобутку. Це сприятиме економічному зростанню регіону та відповідатиме світовим вимогам щодо критичної сировини.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Поняття КМС, методики та методології визначення її критичності, актуальні переліки та стратегії щодо КМС різних країн, зокрема і германію, визначена різними методичними та нормативними документами США, Європейського Союзу, Канади, Австралії (Australia's…, 2023; Canada and U.S…, 2020; Carrara et al., 2023; Hund et al., 2020).

Публікації останніх років із США та інших країн про вилучення германію з бурого вугілля показують активні дослідження в цій галузі (Shpirt et al., 2023; Vogel, Mieke, & Bertau, 2023; Rafique, & Chang, 2022). Інші публікації акцентують увагу на геохімічному аналізі розподілу германію в різних родовищах вугілля, а також на нових технологіях вилучення цього елемента (Luo et al., 2023; An et al., 2022; The Extraction…, 2024).

У дослідженнях останніх років використовують методи гравітаційного поділу, низькотемпературного спікання, хлоридного дистилювання та інші сучасні технології для максимізації вилучення германію та інших рідкісних елементів із залишків вугільного згоряння і золи. Ці дослідження допомагають оптимізувати процеси переробки й вилучення рідкісних елементів з вугілля, що стає дедалі важливішим через зростання попиту на критичні мінерали для сучасних технологій. Дослідження щодо вилучення рідкісноземельних елементів (РЗЕ) та германію з бурого вугілля (лігніту) зосереджені на таких темах, як використання залишкових продуктів вугільної промисловості для видобутку критичних мінералів.

Проблемам вилучення (отримання) та використання критичної сировини досліджувалися у працях вітчизняних фахівців (Шехунова, 2023; Бучинська та ін., 2023; Блайда та ін., 2011; Булат, & Баранов, 2021).

Результати

Германій як елемент критичної сировини. Одним із металів, що є критичним як для США, так і Європейського Союзу, є германій. Серед інших напівпровідникових матеріалів германій за своїми електричними властивостями поступається лише монокристалічному кремнію. Однак якість (чистота) кремнію повинна бути вищою (приблизно в 10 разів), ніж допускається для германію.

Імпорт металевого германію та діоксиду германію (із вмістом германію) у 2023 р. зріс приблизно на 20 % порівняно з 2022 р.

Китай продовжує залишатися провідним світовим виробником і експортером германію. У серпні уряд Китаю запровадив програму ліцензування експорту германію. Експортери повинні були подати заявку на експортну ліцензію для кожної партії германію, надавши уряду інформацію про закордонного покупця та кінцеве використання. Експорт металевого германію (коди експорту Китаю 8112.92.10 і 8112.99.10) за рік до вересня 2023 р. зріс на 34 % до 34 600 кілограмів порівняно з аналогічним періодом 2022 р.

Найбільше цей експорт був спрямований до Росії (21 %), Німеччини (19 %), Гонконгу (18 %), США (17 %), Бельгії (9 %) та Японії (8 %).

Ціни на металевий германій і діоксид германію (Європа, мінімальний вміст 99,999 %) зазвичай зростали між січнем і жовтнем: ціна на металевий германій зросла з 1150 до 1550 доларів за кілограм, а ціна на діоксид германію – з 725 до 940 доларів за кілограм.

Знаходження германію в природі. Слід розглядати питання комплексної розробки вугільних родовищ (зокрема, буровугільних родовищ Закарпаття), зважаючи на наявність у вугіллі крім, германію, ще цілого комплексу хімічних елементів (асоціації хімічних елементів), що належать до рідкоземельних та рідкісних металів, більшість з яких є на цей час критичною сировиною.

Германій часто трапляється у вугільних родовищах разом з іншими рідкоземельними та металевими елементами, такими як галій, ванадій, скандій і рідкоземельні елементи (лантаноїди). Ці елементи можуть бути присутніми у вугільних пластах – у вигляді домішок у мінералах або у структурі органічної речовини. Їх асоціація пояснюється схожими геохімічними умовами утворення та концентрації в осадових басейнах:

1. *Галій* має тісний зв'язок із германієм і трапляється у вугіллі та вугільних золах як домішка. Використовується в напівпровідниках і сонячних батареях, як і германій.

2. *Ванадій* часто трапляється разом з германієм у вугільних родовищах і використовується у виробництві спеціальних сталей і каталізаторів.

3. *Скандій* та інші рідкоземельні елементи зазвичай трапляються у вугіллі через його здатність концентрувати різні метали в осадових породах.

У вугіллі часто присутні мікроелементи, які можуть формувати комплекси або взаємодіяти з іншими елементами та мінералами. Основні елементи, які часто трапляються в різних вугільних родовищах:

1. *Германій (Ge). Утворює сполуки з сіркою або присутній у вигляді оксидів у вугіллі. Германій також може бути пов'язаний з органічною речовиною.*

2. Сірка (S). Зустрічається в піритах (FeS_2), де також можуть бути включені мікроелементи, такі як германій.

3. Арсен (As), свинець (Pb), цинк (Zn). Можуть асоціюватися з піритами або іншими сульфідними мінералами.

4. Рідкісні елементи (наприклад, гафній, тантал, індій): Трапляються у вугільній золі як домішки або в органічній фазі.

Асоціація хімічних елементів з германієм у бурому вугіллі може варіюватися залежно від геологічних умов і регіону. Зазвичай германій асоціюється з такими елементами, як:

1. Цинк (Zn) – германій часто виявляється разом із цинком, оскільки його вилучення зазвичай відбувається як побічний продукт у процесі переробки цинкових руд.

2. Стибій (Sb) та *Арсен (As)* – ці елементи також можуть бути присутніми у вугіллі з германієм, зокрема. в умовах, де вугілля має високий вміст важких металів.

3. *Кремній (Si)* – германій трапляється у вугіллі у формі силікатів. Кремній може бути важливим компонентом для асоціації германію у вугіллі.

4. Свинець (Pb), *Кадмій (Cd)* та *Мідь (Cu)* – вони можуть бути присутніми в низьких концентраціях разом із германієм у вугільних родовищах.

Деякі дослідження вказують, що германій утворює комплекси з кремнеземом та іншими металами у формах, таких як германати, що впливає на технології його вилучення з вугільної золи.

Кожен із цих елементів становить високий комерційний інтерес, оскільки вони використовуються в сучасних технологіях, зокрема у виробництві електроніки, сонячних панелей і магнітів.

Наявні ресурси германію зазвичай пов'язані з деякими цинковими і свинцево-цинково-мідними сульфідними рудами і родовищами бурого вугілля.

Асоціація германію із цими елементами у вугільних родовищах Закарпаття може підвищити економічну цінність комплексного використання цих родовищ, оскільки існують технології, що дають змогу одночасно вилучати кілька критичних елементів з одного джерела.

Світове виробництво германію. Відомо, що германій вироблявся або комерційно перероблявся лише в кількох країнах, включаючи США, Бельгію, Канаду, Китай, Німеччину та Росію.

Китай є лідером з видобутку германію (родовища у Вулантузі та Лінцані). Дані щодо видобутку за останні роки показують, що Китай продовжує утримувати провідні позиції завдяки значним запасам германію у вугільних пластах.

Оскільки більшість виробників не повідомляють публічно про виробництво германію, глобальні дані про виробництво були обмеженими. Багаті на германій родовища, включаючи хвостосховища, які діяли або активно розроблялися, були у США, Китаї, Конго (Кіншаса) та Росії. Однак даних про запаси цих родовищ загалом не було.

Дані про запаси германію не надходили в широких звітах на рівні шахт чи країни, тому їх було важко кількісно визначити.

Наявні ресурси германію пов'язані з деякими цинковими і свинцево-цинково-мідними сульфідними рудами і родовищами бурого вугілля.

Нещодавні звіти включають графіки та таблиці, які показують світову динаміку видобутку германію. Наприклад, у доповіді Геологічної служби США можна знайти діаграми щодо виробництва та споживання германію в різних секторах, таких як оптоелектроніка та сонячна енергетика, що є важливими споживачами цього елемента (Mineral Commodity…, 2024).

Методи вилучення германію з вугілля. Основні методи вилучення германію з вугілля і вугільної золи включають різноманітні хімічні та термічні процеси. Наприклад, вугілля з високим вмістом германію (як у Китаї) проходить обробку з використанням кислотного вилуговування та подальшого осадження з розчинів. У деяких випадках використовують комбінацію флотації та гравітаційного збагачення для підвищення концентрації германію.

Високі концентрації цього елемента часто зустрічаються у збагаченому вугіллі, такому як на вугільному родовищі Вулантуга в Китаї.

Германій присутній у бурому та кам'яному вугіллі в незначних концентраціях, але через його цінність розроблено кілька методів для вилучення цього елемента.

Основні методи вилучення германію з бурого та кам'яного вугілля включають:

1. Гравітаційне збагачення. Цей метод полягає у фізичному розділенні мінералів на основі різниці в їх густині. Для збагачення вугілля та вилучення германію іноді використовують методи важкосередовищного або відсаджувального збагачення. Проте цей метод може бути недостатньо ефективним через те, що германій здебільшого присутній у формі розсіяних сполук або домішок.

2. Флотація. Флотація полягає у відділенні часток вугілля з домішками германію на основі їх гідрофобності або гідрофільності. Для виділення германію додаються флотаційні реагенти, які вибірково захоплюють його сполуки.

3. Гідрометалургія. Гідрометалургійні методи включають вилуговування германію з вугілля або золу після спалювання. Основні підходи:

- кислотне вилуговування: для вилучення германію використовують різні кислоти, такі як сірчана або соляна. Це дає змогу розчинити германій, перетворюючи його в розчин для подальшого очищення;
- лужне вилуговування: застосовується для видалення органічних компонентів та вилуговування германію із золи вугілля за допомогою лужних реагентів, наприклад NaOH.

4. Пірометалургія. Цей метод включає спалювання вугілля, після чого германій концентрується в зольних залишках. Далі германій вилучають із золи за допомогою подальших хімічних операцій, таких як хлорування або сульфідизація.

5. Біогідрометалургія. Новий підхід до вилучення германію, що включає використання мікроорганізмів для розкладання вуглецевих і сірчаних сполук, що містять германій. Це перспективний метод, але він поки що не має широкого промислового застосування.

6. Сублімація. Це високотемпературний метод, за якого германій, наявний у вугіллі, сублімується (перетворюється в пароподібний стан) при високих температурах і потім конденсується з пари. Після цього він може бути очищений.

Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки (табл. 1), і вибір методу залежить від концентрації германію у вугіллі, економічної доцільності та екологічних вимог.

Ці методи основані на різних фізичних процесах, а саме:

1. Піроліз. Термічна обробка вугілля при високих температурах без доступу кисню. Цей процес дає змогу виділити германій у вигляді пари, яка потім може бути конденсована.

2. Газифікація. Вугілля піддається частковому окисленню з утворенням синтез-газу (CO та H_2). Германій при цьому вилучається з летких продуктів та золи.

3. Гідрометалургійні *методи.* Включають вилуговування германію з вугільного попелу кислотами (найчастіше сірчаною або соляною кислотою). Отримані розчини обробляються для осадження германію у вигляді гідроксиду або сульфіду.

4. Сорбційні методи. Германій може бути вилучений з рідких фаз за допомогою спеціальних сорбентів. Цей метод дає змогу відокремити германій з відносно низькими енергетичними витратами.

5. Плазмове збагачення. Плазмові технології також можуть бути використані для вилучення германію з летких продуктів спалювання або газифікації вугілля.

Зазначені методи активно застосовуються в Китаї, Німеччині та Росії, оскільки ці країни мають значні запаси германію, який міститься у вугільних родовища.

Таблиця 1

Основні методи вилучення германію: переваги та недоліки

Методи вилучення германію	Опис технології	Переваги	Недоліки
Хімічне вилучення	Використання кислот або лугів для розчинення германію	Висока ефективність вилучення	Витрати на хімікати та утворення відходів
Термохімічне оброблення	Нагрівання бурого вугілля з добавками для виділення германію	Можливість отримання концентрату	Висока енергоємність процесу
Біохімічне вилучення	Використання мікроорганізмів для біорозкладання вугілля та вилучення германію	Екологічно чистий процес	Низька швидкість процесу
Фізичне сортування	Виділення германієвих мінералів за допомогою механічних або фізичних методів	Простота і низька вартість	Низька ефективність

Станом на 2023 р. основними країнами, що займаються вилученням германію, включаючи видобуток з бурого вугілля, є Китай, Росія та Німеччина. Як вже зазначалось вище, дані про запаси багатьох багатих на германій родовищ (включаючи хвостосховища), які раніше активно розроблялися у США, Китаї, Конго (Кіншаса) та Росії, відсутні.

Німеччина має багатий досвід вилучення германію з бурого вугілля. Германій в основному вилучається з вугільної золи під час спалювання бурого вугілля. Наприклад, процеси екстракції германію в Лужицькому басейні (Lusatian Basin) є одними з найбільш вивчених. За даними одного з досліджень, вміст германію у вугіллі цього регіону може досягати 100 г/т.

Китай також активно досліджує вилучення германію та є світовим лідером з його виробництва з різних джерел, включаючи буре вугілля, зокрема з вугільних відходів та відкладів у провінції Юньнань.

США також досліджують можливості вилучення германію з вугільних відходів, зокрема з попелу після спалювання вугілля. Наприклад, у штаті Монтана були знайдені значні кількості германію у вугільних родовищах.

Ці результати підкреслюють потенціал бурого вугілля як сировини для вилучення критичних металів, таких як германій, та їх важливість для промисловості.

Протягом 2023 р. видобуток германію з вугілля здійснювався в кількох країнах, серед яких найактивніше це робили Китай, Росія та США. Більшість германію добувається як побічний продукт під час переробки цинку та вугілля. Проте детальні цифри відсоткового видобутку германію з вугілля за 2023 р. у відкритих джерелах не публікуються широко, оскільки ці дані є частково комерційною інформацією.

Імпорт металевого германію та діоксиду германію (із вмістом германію), за оцінками, зріс приблизно на 20 % у 2023 р. порівняно з 2022 р. – до 38 000 кг. Імпорт тетрахлориду германію неможливо визначити кількісно за наявними даними торгівлі. Глобальні дані про виробництво та переробку германію були обмеженими, а доступні оцінки було важко перевірити.

Аналіз германієносності буровугільних родовищ та проявів Закарпаття здійснювався за результатами проведених пошуково-розвідувальних та випробувальних робіт протягом 50–80-х років XX ст.

Так, зокрема, за результатами робіт, проведених у 1960 р. Київським геологорозвідувальним трестом, було складено звіт про результати пошуково-випробувальних робіт на германій, виконаних Закарпатською геологорозвідувальною експедицією на території Станіславської та Закарпатської областей СРСР протягом 1958–1959 рр. та надано характеристику по 10 ділянках та вуглепроявах Закарпатської області (Левицкий, 1960).

У звіті наведені результати по 2300 пробах спектрального аналізу та 100 пробах вугілля та порід, що вміщують вугілля. Водночас надаються відомості про спектрографічне визначення інших рідкісних та розсіяних елементів, що трапляються в золі вугілля та вмісних породах, зокрема берилію, галію, скандію, ітрію, ітербію, лантану.

За результатами спектрального аналізу подано деталізацію щодо 25 хімічних елементів. Така кількість була вибрана не випадково, адже відповідно до чинних на той час "Тимчасових вказівок щодо випробування і підрахунку запасів германію та інших рідкісних елементів у родовищах

вугілля" всі проби необхідно піддавати напівкількісному спектральному аналізу з обов'язковою деталізацією по 30 хімічних елементах. Оскільки п'ять елементів не виявлено в жодній з проб, до журналів спектрального аналізу не включені індій, кадмій, титан, рубідій та цезій.

Основні напрями робіт з питань вилучення германію з вугільних родовищ України, зокрема родовищ бурого вугілля Закарпаття, такі:

1. *Проведення подальших геологорозвідувальних робіт* на буровугільних родовищах Закарпаття для пошуку найбільш перспективних на германій ділянок надр. Вивчення умов їх залягання та можливості комплексного їх освоєння.

2. *Вибір сировини.* Германій в основному вилучається з вугільної золи під час спалювання бурого вугілля. Досліджені німецькі бурі вугілля, як перспективна сировина для вилучення германію, оскільки вони містять значні концентрації цього елемента (вміст германію у вугіллі Лужицького басейну може досягати 100 г/т). Проте буре вугілля Закарпаття містить до 250–300 г/т вугільної маси, зокрема окремі ділянки Біганського родовища. Водночас вміст германію в золі останнього, досягає 1000 г/т.

3. *Процеси вилучення*. Розглянуті вище різні технологічні процеси, зокрема такі, як газифікація і піроліз, можуть бути використані для вилучення германію з бурого вугілля Закарпаття.

4. *Екологічні аспекти.* Повинні бути розглянуті екологічні наслідки вилучення германію, зокрема необхідність зменшення викидів і оптимізації процесів для мінімізації впливу на навколишнє середовище.

5. *Перспективи досліджень.* Подальші дослідження необхідні для покращення технологій та збільшення ефективності вилучення германію з бурого вугілля.

Дискусія і висновки

Комплекс проведених попередніх досліджень та вивчення методів вилучення германію з буровугільних родовищ з використанням сучасних технологій, зокрема в Лужицькому басейні (Німеччина) та інших, на підставі даних щодо вмісту та умов поширення рідкоземельних та рідкісних металів, у тому числі і германію, у покладах вугілля та вугільній золі, доводить можливість та доцільність вилучення цих металів під час комплексного використання германієносних лігнітів Закарпаття.

Враховуючи зазначене, для ефективного та раціонального освоєння та комплексного відпрацювання родовищ бурого вугілля Закарпаття, запропоновано:

1. Розробити державну стратегію щодо вилучення рідкісноземельних та рідкісних елементів, зокрема і германію в Україні.

2. Визначити основні переваги переробки бурого вугілля для енергетичної безпеки та технологічного розвитку України.

3. Розробити рекомендації щодо подальших наукових досліджень та інвестицій у видобуток германію в Україні.

4. Встановити податкові пільги для залучення надрокористувачами нових сучасних екологічно чистих технологій з вилучення германію з бурого вугілля.

Внесок авторів: Микола Бурлуцький – концептуалізація, формулювання ідеї і визначення наступних завдань досліджень, методологія, написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування); Станіслав Литвинюк – валідація даних, кінцева обробка матеріалів, написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

Баряцька, Н. В. (2020). Поняття критичної мінеральної сировини – інструмент стимулювання розвитку надрокористування в Україні. *Мінеральні ресурси України*, 2, 13–18.

Блайда, І. А., Васильєва, Т. В., Слюсаренко, Л. І., Хитрич, В. Ф., Барба, І. М., & Васильєва, Н. Ю. (2011). Вилучення германію з відходів свинцево-цинкового виробництва хімічними і мікробіологічними методами. *Хімія металів і сплавів,* 4, 206–211.

Булат, А. Ф., & Баранов, В. А. (2021). Аналіз стану германієносності вугілля України. *Матеріали XIX Міжнародної конференції молодих вчених. Геотехнічні проблеми розробки родовищ,, Дніпро,* с. 7–9.

Бучинська, І. В., Матрофайло, М. М., Побережський, А. В., Ступка, О. О., & Лазар, Г. І. (2023). Поширення германію у вугіллі Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну. *Геологічний журнал*, 4(385), 35–49. https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.284910

Левицкий, Б. П. (1960). *Отчет о результатах поисково-опробовательских работ на германий, произведенных Закарпатской экспедицией на территории Станиславской и Закарпатской областей УССР в 1958–1959 гг.* Т. 1. Киев. геол.-развед. трест.

Литвинюк, С. Ф., & Баряцька, Н. В. (2024). Методичні підходи визначення та оцінки ресурсного потенціалу критичної мінеральної сировини України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія,* 1(104), 77–85. https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.10

Портфоліо критичної сировини України. (2023). Державна служба геології та надр України. https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/ukr/critical-minerals-portfolio-ua.pdf.

Шехунова, С. Б. (2023). Критична та стратегічна мінеральна сировина для економічної безпеки та повоєнного розвитку України. *Вісник НАН України*, 5, 25–30. https://doi.org/10.15407/visn2023.05.025

An, Y.-L., Luo, K., Zhou, J.-X., Nguyen, A., Lu, M.-D., & Meng, Q.-T. (2022). Origin of the Devonian carbonate-hosted Banbianjie Ge-Zn deposit, Guizhou Province, South China: Geological, mineralogical and geochemical constraints. *Qi An Ore Geology Reviews*, 146, 104–696.

Australia's Critical Minerals List. (2023). Department of industry science energy and resources Australia. https://www.industry.gov.au/publications/australias-critical-minerals-list

Canada and U.S. Finalize Joint Action Plan on Critical Minerals Collaboration. (2020). Natural Resources Canada. News release. Ottawa, Ontario. https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2020/01/canada-and-us-finalize-joint-action-plan-on-critical-minerals-collaboration

Carrara, S., Bobba, S., & Blagoeva, D. et al. (2023). *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/386650.

Critical Materials Assessment. (2023). U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf

Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU. *Final Report*. DG GROW, European Commission. https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54114/attachments/1/translations/en/renditions/native

Guidelines. (2017). European Commission. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1

Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank.

Luo, K., Zhou, J. X., Lu, M. D., & An, Y.-L. (2023). Origin of the Devonian carbonate-hosted Banbianjie Ge-Zn deposit, Guizhou Province, South China: Geological, mineralogical and geochemical constraints. *Ore Geology Reviews,*148, 1–24.

Methodology for Establishing the EU List of Critical raw Materials. Guidelines. (2017). European Commission. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1

Mineral Commodity Summaries. (2024). U.S. Geological Survey. Reston, Virginia.

Mykhailov, V., Malyuk, B., Bovsunivskyi, P., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Wellmer, F.-W., Horwath, Z., & Hollis, J. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. Orleans, France: BRGM (pp. 47–48, 181–182, 343).

Rafique, U., & Chang, Y. (2022). *Emerging Technologies and their Role in Critical Raw Materials Recovery*.

Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020.

Shpirt, M. Ya., Stopani, O. I., Lebedeva, L. N., & Kost, L. A. (2020). Germanium Production Technology Based on the Conversion of Germanium-Bearing Lignites. *Solid Fuel Chemistry,* 54(1), 1–10.

The Extraction and Separation of Scarce Critical Metals: A Review of Gallium, Indium and Germanium Extraction. (2024). *MDPI Separations,* Vol. 11, is. 4, p. 91.

Vogel, J., Mieke, N.-H., & Bertau, M. (2023). Germanium: Current and Novel Recovery Processes. *Chemie ingenieur Technik*, 95(6), 877–889.

References

An, Y.-L., Luo, K., Zhou, J.-X., Nguyen, A., Lu, M.-D., & Meng, Q.-T. (2022). Origin of the Devonian carbonate-hosted Banbianjie Ge-Zn deposit, Guizhou Province, South China: Geological, mineralogical and geochemical constraints. *Qi An Ore Geology Reviews*, 146, 104–696.

Australia's Critical Minerals List. (2023). Department of industry science energy and resources Australia. https://www.industry.gov.au/publications/australias-critical-minerals-list

Bariatska, N. V. (2020). The concept of critical mineral raw materials – a tool for stimulating the development of subsoil use in Ukraine. *Mineral resources of Ukraine*, 2,13–18 [in Ukrainian].

Blyda, I. A., Vasylieva, T. V., Slyusarenko. L. I., Khytrych, V. F., Barba, I. M., & Vasylieva, N. Yu. (2011). Extraction of germanium from lead-zinc production waste by chemical and microbiological methods. *Chemistry of metals and alloys,* 4, 206–211 [in Ukrainian].

Buchynska, I. V., Matrofailo, M. M., Poberezhskyi A. V., Stupka O. O., & Lazar G. I. (2023). Distribution of germanium in coal of the LvivVolyn coal basin. *Geological magazine*, 4, 35–49. https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.284910 [in Ukrainian].

Bulat, A. F., & Baranov, V. A. (2021). Analysis of the germanium content of Ukrainian coal. *Proceedings of the XIX International Conference of Young Scientists. Geotechnical problems of deposit development, Dnipro,* p. 7–9 [in Ukrainian].

Canada and U.S. Finalize Joint Action Plan on Critical Minerals Collaboration. (2020). Natural Resources Canada. News release. Ottawa, Ontario. https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2020/01/canada-and-us-finalize-joint-action-plan-on-critical-minerals-collaboration

Carrara, S., Bobba, S., & Blagoeva, D. et al. (2023). Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/386650

Critical Materials Assessment. (2023). U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf

Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU. *Final Report*. DG GROW, European Commission. https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54114/attachments/1/translations/en/renditions/native

Guidelines. (2017). European Commission. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1

Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank.

Levytskyi, B. P. (1960) *Report on the results of prospecting and testing for germanium, carried out by the Transcarpathian Expedition on the territory of the Stanislavsky and Transcarpathian regions of the Ukrainian SSR in 1958–1959*. Vol. 1. Kyiv. geol.-exploration trust [in Russian].

Luo, K., Zhou, J. X., Lu, M. D., & An, Y.-L. (2023). Origin of the Devonian carbonate-hosted Banbianjie Ge-Zn deposit, Guizhou Province, South China: Geological, mineralogical and geochemical constraints. *Ore Geology Reviews,*148, 1–24.

Lytvyniuk, S, & Bariatska, N. (2024). Methodological approaches for determination and assessing the resource potential of critical raw materials in Ukraine. *Vysnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 1(104), 77–85. https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.10 [in Ukrainian].

Methodology for Establishing the EU List of Critical raw Materials. Guidelines. (2017). European Commission. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1

Mineral Commodity Summaries. (2024). U.S. Geological Survey. Reston, Virginia.

Mykhailov, V., Malyuk, B., Bovsunivskyi, P., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Wellmer, F.-W., Horwath, Z., & Hollis, J. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. Orleans, France: BRGM (pp. 47–48, 181–182, 343).

Portfolio of critical raw materials of Ukraine. State Service of Geology and Subsoil of Ukraine (2023). https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/ukr/critical-minerals-portfolio-ua.pdf [in Ukrainian].

Rafique, U., & Chang, Y. (2022). *Emerging Technologies and their Role in Critical Raw Materials Recovery*.

Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020.

Shehunova, S. B. (2023). Critical and strategic mineral raw materials for economic security and post-war development of Ukraine. *Visn. NAS of Ukraine,* 5, 25–30. https://doi.org/10.15407/visn2023.05.025 [in Ukrainian].

Shpirt, M. Ya., Stopani, O. I., Lebedeva, L. N., & Kost, L. A. (2020). Germanium Production Technology Based on the Conversion of Germanium-Bearing Lignites. *Solid Fuel Chemistry,* 54(1), 1–10.

The Extraction and Separation of Scarce Critical Metals: A Review of Gallium, Indium and Germanium Extraction. (2024). *MDPI Separations,* 11(4) 91.

Vogel, J., Mieke, N.-H., & Bertau, M. (2023). Germanium: Current and Novel Recovery Processes. *Chemie ingenieur Technik*, 95(6), 877–889.

Отримано редакцією журналу / Received: 02.09.24
Прорецензовано / Revised: 21.11.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Mykola BURLUTSKYY, PhD (Geol.)
ORCID ID: 0009-0000-6718-3006
e-mail: Nikolay2205@i.ua
State Geology and Subsoil Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Stanislav LYTVYNIUK, PhD (Geol.)
ORCID ID: 0000-0003-3763-2100
e-mail: lytvyniuksf@gmail.com
State Commission of Ukraine on Mineral Resources, Kyiv, Ukraine

GERMANIUM AS AN ELEMENT OF CRITICAL RAW MATERIALS. COAL DEPOSITS OF TRANSCARPATTIA – A SOURCE OF GERMANY IN UKRAINE

The concept of critical raw materials as it is interpreted in the USA, the European Union and other countries is defined. The main stages of the formation of the regulatory framework and the requirements of the USA and the EU regarding critical raw materials are provided. The chronology of changes in the amount of minerals, which are a component of critical mineral raw materials, is considered.

Ukraine is a country with a powerful mineral and raw material base, the riches of its subsoil are determined by the peculiarities of the geological structure of its territory. At the same time, our country is one of the world's leading producers of some types of minerals, including such important raw materials as manganese, titanium and graphite. There are about 22 critical minerals in our country, which are included, in particular, in the list of critical for the EU.

The analysis and prospects of using various methods and modern technologies with the aim of extracting germanium as one of the elements of critical raw materials were carried out. The possibility of using modern extraction methods in Ukraine, in particular for the lignite deposits of Transcarpathia, was considered.

At the same time, in Ukraine, it is the lignite deposits of Zakarpattia that have the potential to become an important source for the extraction of rare (rare earth) elements, particularly germanium. The reasons for the involvement of modern world technologies, which would contribute to the production of lignite in Zakarpattia in compliance with all existing ecological and socio-ecological requirements of the current legislation, have been determined.

The association of germanium with rare (rare earth) elements in these deposits can increase the economic value of their complex use, since there are foreign technologies that allow simultaneous extraction of several critical elements from one source.

The economic expediency of complex coal processing is indicated, taking into account the possibility of obtaining energy and critical elements, in particular germanium.

The introduction of leaching and flotation technologies is proposed to increase the efficiency of extraction. This will contribute to the economic growth of the region and meet global requirements for critical raw materials.

It is pointed out the need to introduce a Strategy for the extraction of rare earth and rare metals in Ukraine to improve the economic situation in the mining industry, in particular, the need for comprehensive development of lignite deposits, in particular Zakarpattia, with the use of lignite as fuel and rare earth metals as a source of modern technologies in industry.

K e y w o r d s : ***critical mineral raw materials, germanium, lignite deposits, rare earth and rare metals, extraction of germanium.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 621.22+556.5
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.12

Олександр ОБОДОВСЬКИЙ[1], д-р геогр. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-5472-3222
e-mail: obodovskiy58@gmail.com

Костянтин ДАНЬКО[2], канд. геогр. наук
ORCID ID: 0000-0002-6060-9657
e-mail: kostiantyn.danko@gmail.com

Олена ПОЧАЄВЕЦЬ[1], канд. геогр. наук
ORCID ID: 0000-0003-4521-9922
e-mail: olena.pochaievets@knu,ua

Наталія КОРОГОДА[1], канд. геогр. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-1518-2997
e-mail: nkorogoda@knu.ua

Василь ГРЕБІНЬ[1], д-р геогр. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-8197-607X
e-mail: grebin1964@gmail.com

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
[2]Український гідрометеорологічний інститут, Київ, Україна

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНО МОЖЛИВОГО ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РІЧОК УКРАЇНИ (НА ПРИКЛАДІ РАЙОНУ БАСЕЙНУ РІЧКИ ДНІПРО)

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Вступ. *Диверсифікація джерел виробництва електроенергії набуває значної уваги в період сьогодення в Україні. Особливо це актуалізується виведенням з ладу російськими агресорами електрогенеруючих потужностей ТЕС та великих ГЕС. У цьому контексті стає важливим задіяння альтернативних (відновлювальних) енергетичних джерел, зокрема малої гідроенергетики. Саме тому актуальним є дослідження технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок.*

Методи. *Обґрунтування та величину технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок можна визначити із запропонованої нами загальної схеми встановлення потенціалу для річок України. Для цього проведено експертну оцінку основних ризиків, які можуть спричинити зниження загального виробництва гідроелектроенергії.*

Результати. *Встановлено, що найбільший відсоток втрат технічно можливого потенціалу, відносно загального гідроенергетичного потенціалу, притаманний басейнам річок Прип'яті, Стоходу та Самари і коливається в межах 48–58,5 %. Тут провідну роль відіграють похили русел річок та заболоченість їх водозборів. Найменші показники цих втрат характерні для таких річок, як Супій, Ірклій, Ствига та Уж, і змінюються від 23 до 25 %. Пріоритетними тут є втрати, зумовлені заболоченістю та меліорацією території заплав.*

Висновки. *Придатними до використання, з урахуванням всіх потенційних втрат і ризиків, можна вважати 226087 кВт (39 %) від загального гідроенергетичного потенціалу досліджуваних річок.*

Ключові слова: *технічно можливий гідроенергетичний потенціал, енергія річок, район басейну річки Дніпро, оцінка ризиків, карта.*

Вступ

Використання різних джерел виробництва електроенергії набуває значної уваги в період сьогодення в Україні. Особливо це актуалізується виведенням з ладу російськими агресорами електрогенеруючих потужностей ТЕС та великих ГЕС. У цьому контексті стає важливим задіяння альтернативних (відновлювальних) енергетичних джерел, зокрема малої гідроенергетики. Натомість варто звернути увагу на енергетичні можливості малих та середніх річок. Разом з тим постає питання: чи можна використовувати всю енергію цих водотоків? У цьому сенсі існує низка суджень та обґрунтувань, які регламентують розподіл гідроенергетичного потенціалу річок як їхнього важливого ресурсу, так і створення необхідних, передусім, екологічних умов його використання. У класичній літературі розглядаються такі види гідроенергетичного потенціалу річок: теоретичний (природний/валовий), загальний гідроенергетичний потенціал – повна теоретична сума енергії річкового стоку, технічно можливий гідроенергетичний потенціал та економічно обґрунтований гідроенергетичний потенціал. До цієї схеми ми ввели поняття екологічного гідроенергетичного потенціалу (Ободовський та ін., 2016).

У даному дослідженні було зроблено спробу дослідити саме технічно можливий гідроенергетичний потенціал річок як потенціал, який є технічно можливим для використання. У цьому полягала основна ***мета роботи***.

Об'єктом дослідження обрано річки району басейну річки Дніпро (за винятком самого Дніпра) за гідрографічним районуванням України (Хільчевський, & Гребінь, 2017). Усі дослідження виконано в період до військового стану по 2020 р. включно з врахуванням останніх кліматичних змін.

Методи

Обґрунтування та величину технічно можливого гідроенергетичного потенціалу (ТМГП) річок можна визначити із запропонованої нами загальної схеми встановлення потенціалу для річок України (Ободовський, Данько, & Почаєвець, 2017; Hydropower Potentional, 2021). Ця схема може бути представлена у вигляді алгоритму (рис. 1).

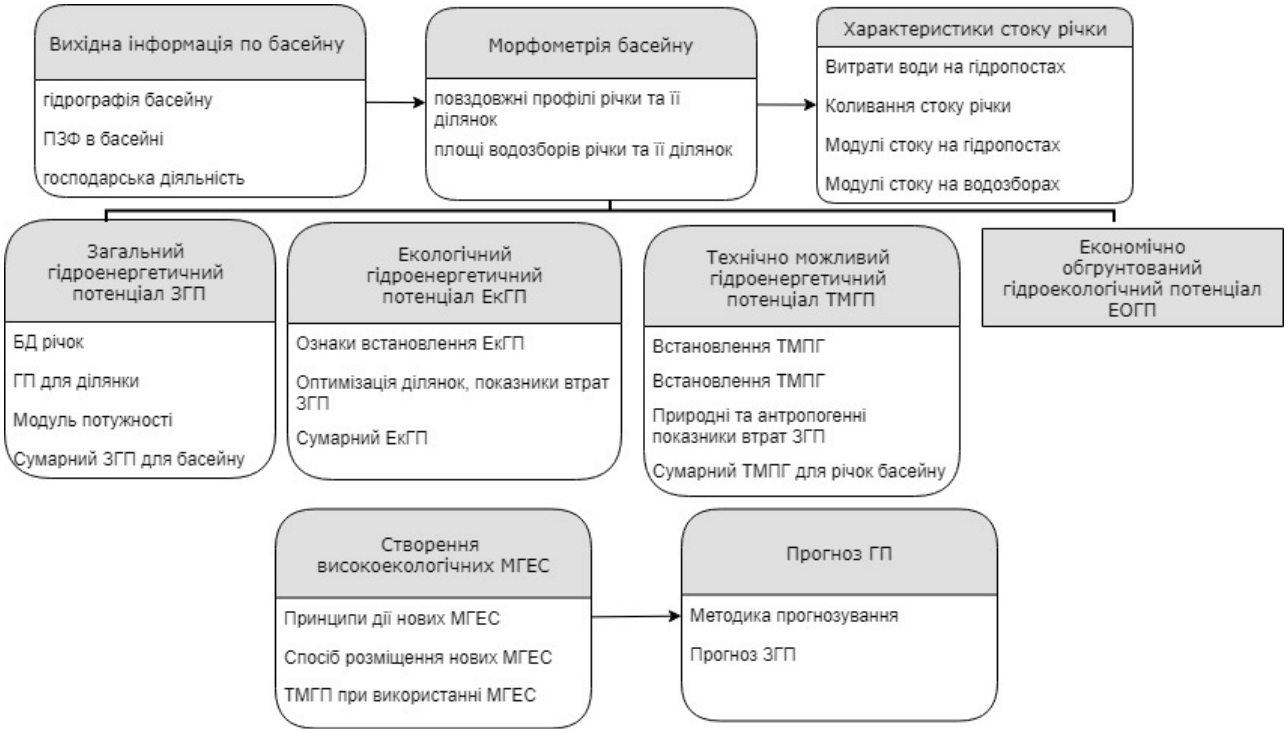


Рис. 1. Алгоритм встановлення гідроенергетичного потенціалу для річок України (Ободовський, Данько, & Почаєвець, 2017; Hydropower Potentional, 2021)

Визначення ТМГП річок є одним із кінцевих блоків встановлення величини потенційних гідроенергоресурсів. Загальна схема визначення даної характеристики (рис. 1) передбачає розрахунок енергетичного потенціалу, з врахуванням екологічних втрат і втрат на ризики природних та антропогенних чинників.

Під технічно можливим гідроенергетичним потенціалом можна розуміти ту частину загального гідроенергетичного потенціалу, яка є технічно можливою для використання. За (Цепенда, 2009), його визначають виходячи з потенціалу водних ресурсів, які варто зменшити як ризики від втрат, пов'язаних із фільтрацією та випаровуванням при створенні значних за площею водосховищ, неможливістю повного використання стоку води річки (слабке його зарегулювання, можливі відбори води, відсутність комунікацій та ЛЕП тощо). Його величина залежить також від: а) геологічних умов (середовища) – тектонічні розломи, тектонічні рухи, землетруси, карст, зсуви та селі; б) гідрогеологічних умов – рівень залягання підземних вод; в) орографії басейну – крутизна схилів та похили річок, фізичних властивостей ґрунтів – суфозія, просідання, набрякання тощо (Цепенда, 2009; Рудько, & Консевич, 1998).

Щодо встановлення технічного можливого потенціалу в роботах (Ободовський, Данько, & Почаєвець, 2017; Obodovskiy et al., 2020; Hydropower Potentional, 2021), зазначається, що величини, пов'язані із втратами водних ресурсів (втрати напору і втрати стоку), зазвичай можуть змінюватися в межах від 3 до 10 %. Причому максимальні значення характерні для дериваційних ГЕС. Крім того, механічні втрати при перетворенні гідравлічної енергії в електричну можуть сягати 11–13 %. Разом величина цих втрат становить максимум 22–24 %. За старих конструкцій ГЕС та їх турбін вони неминучі. Отже, реальне використання загального гідроенергетичного потенціалу (ЗГП), пов'язане із втратами водних ресурсів, становить орієнтовно 87 %, а в окремих випадках може досягати 75 %. Натомість для річок загалом ці втрати можуть становити навіть понад 40 % (Малі річки, 1991).

До чинників, які, безумовно, суттєво знижують технічно можливий потенціал, треба віднести й екологічний потенціал річок (Kryvets, Obodovskyi, & Pochaievets, 2022; Бриль, Васько, & Мороз, 2019; Гідроенергетичний потенціал, 2018). Величину енергії технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок можна визначити із запропонованої нами загальної схеми встановлення потенціалу для річок України за таким виразом:

$$E_{ТМГП} = E_{ЕКГП} - E_{ВТРАТ}, \quad (1)$$

де $E_{ТМГП}$ – енергія технічно можливого гідроенергетичного потенціалу; $E_{ЕКГП}$ – енергія екологічного гідроенергетичного потенціалу; $E_{ВТРАТ}$ – енергія ризиків, пов'язаних із втратами водних ресурсів, небезпечними геологічними та гідрогеологічними процесами, небезпечною екзогенною діяльністю, антропогенним впливом тощо. Якщо загальний енергетичний потенціал може бути встановлений з попередніх досліджень (Ободовський та ін., 2017; Obodovskiy et al., 2020; Hydropower Potentional, 2021), то величини $E_{ЕКГП}$ визначаються для природоохоронних територій (Kryvets, Obodovskyi, & Pochaievets, 2022). Невідомою величиною в правій частині рівняння (1), яка, власне, і відображає $E_{ТМГП}$, залишається $E_{ВТРАТ}$.

У своїх розрахунках $E_{ТМГП}$ ми користуємося експертною оцінкою основних ризиків, які можуть знижувати загальне виробництво гідроелектроенергії (Obodovskiy et al., 2020; Ободовський та ін., 2016; Проблеми гідрології, 2019; Hydropower Potentional, 2021). Серед показників цього потенціалу (як природних, так і антропогенних), які вказують на ці ризики для рівнинних річок, запропоновано такі (Obodovskiy et al., 2020; Ободовський та ін., 2016; Проблеми гідрології, 2019):

- наявність розгалужених типів русел річок ($E_{РУСЛ}$);
- похили річок і ширина заплави ($E_{ЗАП}$);
- ерозія ґрунтів, заболоченість (екзогенні процеси), ($E_{ЕКЗО}$);
- карст ($E_{КАРСТ}$);

- зарегульованість стоку та меліорація територій ($E_{ЗМ}$);
- відсутність комунікацій та ЛЕП ($E_{КЛЕП}$);
- селитебне навантаження та інша господарська діяльність ($E_{СНГД}$).

Перші чотири показники можна віднести до природних, наступні три є антропогенними. "Питома вага" ризику на зменшення загального гідроенергетичного потенціалу кожного із цих показників для річок, які протікають у різних природних умовах, є різною (Архипова, 2011; Атлас енергетичного потенціалу, 2020). Тому для них уведено відсоткові величини зменшення загального гідроенергетичного потенціалу, які можна використовувати як для басейнового ЗГП, так і для відповідних ділянок річок. Ці показники (у %) можна представити у вигляді відповідної оціночної таблиці (табл. 1).

Таблиця 1

Зменшення (ризики впливу) ЗГП для рівнинних річок України (на прикладі району басейну річки Дніпро)

№ п\п	Дія на ЗГП	Виражено у %						
		Розгалужені типи русел річок	Похили річок і ширина заплави ($E_{ЗАП}$)	Ерозія ґрунтів, заболоченість (екзогенні процеси) ($E_{ЕКЗО}$)	Карст ($E_{КАРСТ}$)	Зарегульованість стоку та меліорація територій ($E_{ЗМ}$)	Відсутність комунікацій та ЛЕП ($E_{КЛЕП}$)	Селитебне навантаження та інша господарська діяльність ($E_{СНГД}$)
1	Відсутня	0	($B_{зап}/B_р$<3, I >0,0005)	0	0	0	0	0
2	Слабка	0,1–1	($B_{зап}/B_р$<5, 0,005>I >0,003)	1–10	0,1–7,5	0,01–5	0,1–5	0,1–5
3	Помірна	1–5	($B_{зап}/B_р$<10, 0,003>I >0,0015)	10–20	7,5–15	5–10	5–10	5–10
4	Сильна	>5	($B_{зап}/B_р$<15, I <0,0015)	>20	>15	>10	>10	>10

*Примітки.**$B_{зап}$ – ширина заплави (м), $B_р$ – ширина русла (м).

Перший із природних показників стосується зміни умов руслоформування і, як наслідок, наявності розгалужених типів русел річок ($E_{РУСЛ}$) (табл. 1). При переході із врізаного меандруючого русла (або з русла з розвинутими алювіальними формами) до розгалуженого русла (руслова або заплавна багаторукавність) зменшуються похили річок і падає їх транспортувальна (енергетична) здатність (Ободовський, 2001; Ободовський, Хільчевський, & Ободовський, 2018). А з іншого боку, на ділянках з багаторукавним руслом виникають певні складнощі з проєктуванням та будівництвом ГЕС. Але такі ділянки русла річок мають незначне поширення (не більше 6 % протяжності всіх річок) на території досліджуваного басейну (Ободовський, 2001).

Наступним "природним" екзогенним чинником, який потенційно зменшує ЗГП річок, є відповідні похили річок та ширина їх заплави ($E_{ЗАП}$). Частка наведених показників загалом становить суттєві ризики щодо зменшення загального гідроенергетичного потенціалу і є різною для річок регіону. Ураховуючи те, що територія району басейну Дніпра є доволі строкатою з огляду на рельєфоутворення, вказані в табл. 1 показники можуть суттєво зменшувати використання ЗГП. Насамперед ідеться про похил річки. За малих похилів поліських річок у суббасейнах Прип'яті та Десни і водночас за наявності широких, подекуди заболочених заплав, використання ЗГП стає доволі проблематичним і має суттєві обмеження, які наведені у показниках табл. 1 (Ободовський, 2001; Obodovskiy et al., 2020).

Наступний показник стосується екзогенних процесів, тобто ризиків від ерозії ґрунтів і заболоченості території ($E_{ЕКЗО}$) (табл. 1). "Внесок" показників ерозії ґрунтів і заболоченості на ній на ЗГП може бути навіть дещо більшим, ніж у попередньому випадку, але вони досить взаємопов'язані. Так, ерозія ґрунтів може виражатися через похили річки, а відносна ширина заплави може бути зумовлена її висотою і врешті-решт заболоченістю. Такі ділянки на території досліджуваного басейну притаманні верхів'ям Прип'яті, нижнім течіям річок Случі, Горині, Уборті, Сули. На таких ділянках річок величини ЗГП можуть бути доволі зменшені.

Поширення карсту на території досліджуваного басейну також потенційно може зменшувати величину ЗГП ($E_{КАРСТ}$) (табл. 1). Вплив карсту може проявлятись у ймовірності просідання території, а також інженерних споруд, розташованих на ній, перерозподілі стоку річок, активізації небезпечних екзогенних процесів. На досліджуваній території карст поширений у басейнах Вижівки, Турії, Стохода, Стирі, Горині, Знобівки та Інгульця. Загалом ризики від впливу карсту на ЗГП на території досліджуваного басейну незначні (Проблеми гідрології, 2019).

Серед чинників, які зумовлені антропогенним впливом щодо зменшення ЗГП, можна виділити зарегульованість стоку та меліорацію земель (Eзм) (табл. 1). В умовах зарегулювання стоку й особливо за наявності меліоративних територій у межах водозбірних площ річок, можливе досить суттєве зменшення ЗГП. Воно пов'язане передусім із порушеннями гідравлічних параметрів потоку річок, їх похилів (напорів) та умов функціонування системи "потік-русло", спричинених перерозподілом витрат води. На території досліджуваного басейну зарегульованих ділянок річок небагато, а меліоровані площі займають доволі значну територію. Особливо це стосується поліських річок, нижньої течії Росі, Вільшанки, Тясмину та Конки.

Наступним антропогенним чинником, який може зменшити ЗГП, є відсутність комунікацій та ліній електропередач у межах водозбірних басейнів та вздовж річок ($E_{КЛЕП}$) (табл. 1). Виробництво електроенергії, особливо на малих ГЕС, є доцільним за умов близької відстані до енергоспоживача (0,5–2,5 км) (Рудько, & Консевич, 1998).

Водночас мають бути облаштовані різні комунікації (дороги, мости, інші інженерні споруди), а також розміщені в безпосередній близькості населені пункти та інші енергоспоживачі (підприємства, туристичні бази, інша інфраструктура). Важлива також наявність існуючих ліній електромереж, до яких можуть бути під'єднані нові потужності. Разом з тим оптимізація місць спорудження ГЕС має враховувати значну обмеженість створення великих за площею водосховищ і високих гребель (Бриль, Васько, & Мороз, 2019), які суттєво

порушують екологічні умови функціонування річкової системи та природного середовища.

До інших антропогенних чинників, які потенційно зменшують ЗГП, можуть бути віднесені: щільність селитебного навантаження (особливо в русло-заплавному комплексі річок), знеліснення територій, видобуток корисних копалин у русло-заплавному комплексі і на водозборі та ін. ($E_{СНГД}$) (табл. 1). Населені пункти в багатьох випадках розташовані вздовж долин (русел) річок, причому їх протяжність може сягати кількох кілометрів. У свою чергу, надмірна оранка території може призвести як до зростання кількості наносів, що надходять у річку (р. Самара, р. Вовча) і змінюють гідравлічну структуру потоку, так і до збільшення активності ерозійної діяльності на схилах (екзогенні процеси). На зменшення ЗГП може також вплинути видобування будівельних матеріалів, шахтне і відкрите розроблення корисних копалин, розроблення нафтових та газових родовищ (р. Сула), що може призвести до активізації різних екзогенних та ендогенних процесів. Також до цього переліку варто долучити забір руслового та заплавного алювію на ділянках річок та їх руслах (р. Десна). Цей чинник може зумовити "просідання рівнів води", зміни похилів водної поверхні та зменшення величини напору, що може збільшити ризики на скорочення гідравлічних ресурсів річки або її ділянки.

Всі перелічені ризики встановлюються для певних ділянок річок, а за ними – для річки у цілому (Obodovskiy et al., 2020; Проблеми гідрології, 2019).

Провівши експертно-критеріальний аналіз можливого ризику від впливу різних природних та антропогенних чинників на зменшення величини загального гідроенергетичного потенціалу, встановлено загальну сумарну кількість втрат його величини та ризиків їх впливу на зменшення ЗГП для рівнинних річок (на прикладі району басейну річки Дніпро) (Obodovskiy et al., 2020):

$$\sum E_{ВТРАТ} = E_{РУСЛ} + E_{ЗАП} + E_{ЕКЗО} + E_{КАРСТ} + E_{ЗМ} + E_{КЛЕП} + E_{СНГД}. \quad (2)$$

Максимальні теоретичні (гіпотетичні) втрати за формулою (2) у разі сильної їх дії (або переважному визначеному впливові одного із них) можуть взагалі становити 100 % ЗГП, а використання гідроенергії на певній ділянці річки є неможливим. Але практично вказані втрати у разі значного впливу його на ЗГП за всіма вказаними ризиками можуть досягати 60–85 % втрат для річок досліджуваного басейну.

Для виявлення цих втрат було проведено експертні оцінки прояву руслових процесів (Ободовський, 2001) та використано картографічні матеріали електронної версії (це дало змогу точніше оцінити природні особливості в масштабі регіону) "Національного атласу України" (Національний атлас України, 2007). Також для встановлення антропогенних ризиків було залучено деякі літературні джерела та топографічні карти масштабів 1 : 50 000 та 1 : 100 000, за якими проводився аналіз зарегульованості річок досліджуваного регіону, ступінь меліоративного та селитебного освоєння території та оцінка наявності комунікацій у регіоні.

Результати

Район річкового басейну Дніпра має площу водозбору 296,3 тис. км^2 (Хільчевський, & Гребінь, 2017). Загальна кількість ділянок дослідження – 1704, які розміщені на 788 річках. Критеріями відбору ділянок були зміни похилу річки та її водності (впадіння притоки). Для річок площі водозбору було обрано не меншими 100 км^2, з витратами води понад 0,3 м^3/с (Obodovskiy et al., 2020; Проблеми гідрології, 2019). Найбільша кількість річок та ділянок на них зосереджена в межах суббасейну Середнього Дніпра – відповідно 620 ділянок на 296 річках. Найменша – в суббасейні Десни в межах України – 211 ділянок на 75 річках. Річки району річкового басейну Дніпра належать до категорії рівнинних, характеризуються незначними перепадами висот та помірною густотою річкової мережі. Модуль стоку змінюється від 0,2 до 1 л/с км^2 у суббасейні Нижнього Дніпра, від 1 до 2,5 л/с км^2 у межах Середнього Дніпра та від 2,5 до 4 л/с км^2 у суббасейнах Прип'яті та Десни (River Runoff, 2020; Лук'янець та ін., 2021).

Завдяки детальному аналізу розподілу гідроенергетичних потужностей досліджуваних річок можна виділити найбільш та найменш доцільні для використання та виробництва електроенергії ділянки. Запропонована схема дає змогу достатньо об'єктивно оцінити майбутню ефективність потенційної ділянки для будівництва різних видів ГЕС, включаючи і високоекологічні малі гідроелектростанції (ВЕГЕС) (Онищук, & Ободовський, 2017; Ободовський, Онищук, & Почаєвець, 2019). Враховуючи абсолютні показники технічно можливого потенціалу, а також відповідні відсотки характерних та переважних ризиків (характер прояву екзогенних або ендогенних процесів, антропогенну діяльність), можна визначити найперспективніші ділянки річок для енергетичного їх освоєння.

За запропонованими підходами було розраховано величини технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок району басейну річки Дніпро (табл. 2, рис. 2).

Для обчислення ТМГП було проаналізовано вказані ризики (табл. 1), які дали змогу створити карту розподілу технічно можливого гідроенергетичного потенціалу району басейну річки Дніпро (рис. 2). Відповідні характеристики ТМГП основних річок наведено в табл. 2 (переважно притоки першого – третього порядків), а за суббасейнами – в табл. 3.

Враховуючи те, що територія басейну Дніпра (у межах України) надзвичайно різноманітна як за природними умовами, так і за ступенем господарського освоєння, вплив природно-антропогенних дескрипторів на показник ТМГП суттєво різниться в просторовому відношенні (табл. 2).

Так, найбільший відсоток втрат технічно можливого потенціалу щодо ЗГП притаманний Прип'яті, Стоходу та Самарі і коливається в межах 48–58,5 %. Тут провідну роль відіграють похили русел річок та заболоченість їх водозборів. Найменші показники цих втрат характерні для таких річок, як Супій, Ірклій, Ствига та Уж, і змінюються від 23 до 25 %. Пріоритетними тут є втрати, зумовлені заболоченістю та меліорацією території заплав.

Стосовно оцінок частки втрат та технічно можливого гідроенергетичного потенціалу ($E_{ЕКГП}$) річок основних суббасейнів річки Дніпро, то в межах суббасейну Середнього Дніпра його загальні втрати в середньому коливаються в межах 23–45 %. До територій, які були виключені ще на етапі врахування екологічних втрат потенціалу ($E_{ЕКГП}$) (Kryvets, Obodovskyi, & Pochaievets, 2022) (рис. 1), додались ще басейни рр. Псел, Ворскла, Красна, Рось та Тясмин, технічно можливий потенціал яких становить 0 кВт, оскільки він весь покривається екологічним гідроенергетичним потенціалом. Отже сумарний технічно можливий потенціал річок суббасейну Середнього Дніпра становить 30647 кВт, що дорівнює лише 20 % від його загального гідроенергетичного потенціалу.

Таблиця 2

Частка втрат та оцінений технічно можливий гідроенергетичний потенціал ($E_{ТМГП}$) річок основних суббасейнів річки Дніпро

№	Річка	Втрати потенціалу через розгалуження русел	Втрати потенціалу через похили та ширину заплави	Втрати потенціалу через ерозію та заболоченість	Втрати потенціалу через карст	Втрати потенціалу через зарегульованість та меліорації	Втрати потенціалу через недостатню розвиненість комунікації	Втрати потенціалу через стан селитебного навантаження	Загальний % втрат ГП	Сума втрат, кВт	ТМГП, кВт
Суббасейн Середнього Дніпра											
1	Трубіж	1	5	5	1	4	5	5	26	483	1183
2	Супій	3	4	5	2	3	1	5	23	224	693
3	Золотоношка	1	5	5	1	4	5	5	26	82	142
4	Ірклій	3	4	5	2	3	1	5	23	29	0
5	Сула	3	12	13	2	4	2	5	41	7401	786
6	Псел	0	13	15	1	3	3	4	39	13531	0
7	Ворскла	0	12	12	2	3	2	7	38	7712	0
8	Тетерев	1	3	0	1	15	1	5	26	10446	27305
9	Ірпінь	1	5	0	1	15	1	5	28	1168	0
10	Стугна	1	5	10	0	15	1	5	37	281	228
11	Красна	1	5	10	0	15	1	5	37	135	0
12	Рось	1	3	15	0	20	1	5	45	12172	0
13	Вільшанка	1	5	5	0	15	1	5	32	229	310
14	Тясмин	5	4	15	0	15	1	5	45	1818	0
15	Цибульник	1	2	15	0	15	1	5	39	99	0
16	Омельник	1	2	15	0	15	1	5	39	165	0
Разом по суббасейну											**30647**
Суббасейн Нижнього Дніпра											
1	Орель	0	12	11	2	4	2	10	41	2742	0
2	Самара	0	15	15	2	6	2	8	48	6582	3379
3	Ворона	0	3	15	1	5	5	3	32	16	0
4	Плоська Осокорівка	0	3	15	0	5	3	5	31	29	0
5	Конка (Кінська)	0	5	10	0	3	1	9	28	417	339
6	Малі притоки Дніпра	1	2	15	0	15	1	5	39	43	66
7	Мокра Сура	1	2	15	0	15	1	5	39	371	0
8	Томаківка	1	2	15	0	15	1	5	39	129	0
9	Базавлук	1	1	10	5	15	1	5	38	1400	0
10	Інгулець	1	2	10	7.5	20	1	5	46.5	5192	0
Разом по суббасейну											**3783**
Суббасейн р. Прип'ять											
1	Прип'ять	1	20	15	5	7,5	5	5	58,5	58169	0
2	Вижівка	0	1	12	10	7,5	2	2	34,5	236	0
3	Тур'я	0	1	12	10	12	2	2	39	887	0
4	Коростянка	0	1	12	10	12	2	2	39	55	85
5	Стохід	5	12	12	7,5	12	2	2	52,5	1445	0
6	Веселуха	0	5	7,5	10	10	2	2	36,5	162	0
7	Стир	0	5	7,5	7,5	10	3	2	35	10088	943
8	Горинь	0	5	7,5	7,5	10	1	4	35	27442	12719
9	Ствига	0	5	5	0	10	3	2	25	670	1315
10	Уборть	1	5	5	0	10	3	2	26	1898	1192
11	Словечна	0	10	10	0	10	3	2	35	356	460
12	Желонь	0	5	5	0	15	3	2	30	65	7
13	Уж	0	5	5	0	10	2	3	25	4346	1217
Разом по суббасейну											**17938**
Суббасейн р. Десна											
1	Снов	0	10	6	2	6	8	3	35	3014	4150
2	Рогізна	0	10	3	6	2	6	3	30	32	0
3	Знобівка	0	10	3	8	8	6	3	38	353	0
4	Свига	0	10	3	7	8	7	3	38	280	387
5	Смяч	0	12	3	7	6	5	3	36	59	79
6	Рома	0	10	3	7	2	5	5	32	31	60
7	Івотка	0	12	3	6	8	5	3	37	531	524
8	Шостка	0	10	3	5	8	3	6	35	160	0
9	Малотечка	0	10	3	2	2	4	6	27	31	0
10	Ласка	0	10	3	2	5	4	4	28	38	0
11	Осота	0	12	3	2	3	2	7	29	46	0
12	Єсмань	0	12	3	2	8	8	2	35	330	331
13	Стрижень	0	15	3	2	6	4	5	35	37	0

Закінчення табл. 2

№	Річка	Втрати потенціалу через розгалуження русел	Втрати потенціалу через похили та ширину заплави	Втрати потенціалу через ерозію та заболоченість	Втрати потенціалу через карст	Втрати потенціалу через зарегульованість та меліорації	Втрати потенціалу через недостатню розвиненість комунікації	Втрати потенціалу через стан селитебного навантаження	Загальний % втрат ГП	Сума втрат, кВт	ТМГП, кВт
14	Убідь	0	15	3	2	8	5	4	37	611	352
15	Сейм	0	15	12	5	7	2	6	47	3887	2337
16	Мена	0	15	3	2	8	1	7	36	113	153
17	Береза	0	15	3	2	4	6	1	31	295	641
18	Смолянка	0	15	3	2	6	8	3	37	30	32
19	Замглай	0	15	3	2	8	8	3	39	83	131
20	Стрижень	0	10	3	2	3	2	9	29	25	0
21	Білоус	0	10	3	2	2	5	3	25	121	311
22	Вздвиж	0	12	3	2	5	4	4	30	33	77
23	Старуха	0	12	3	2	4	5	4	30	30	70
24	Мета	0	12	3	2	4	5	4	30	10	24
25	Остер	0	13	7	2	8	5	5	40	613	858
26	Десна	0	12	4	3	6	5	4	34	37557	40697
Разом по суббасейну											**51214**
Разом по басейну											**103582**

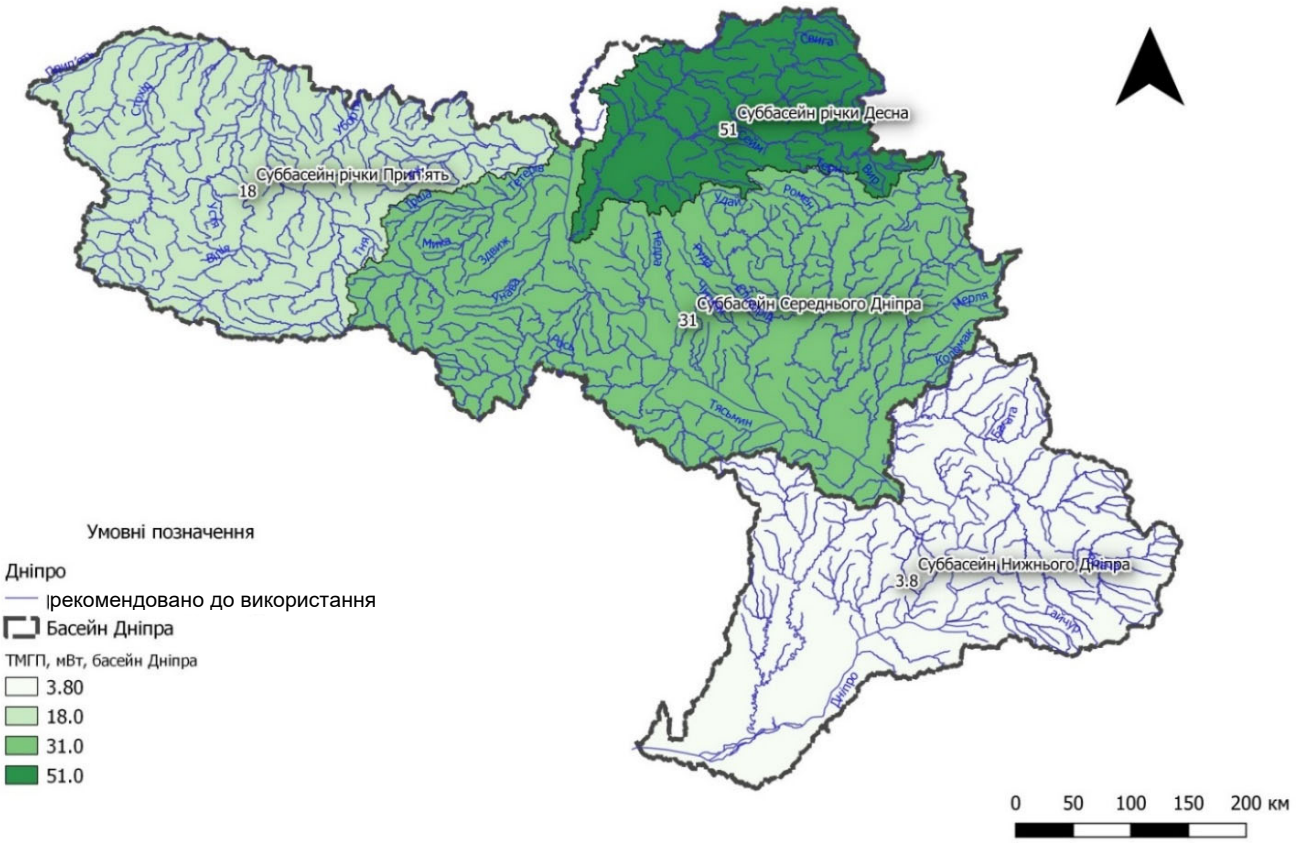


Рис. 2. Карта розподілу технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок басейну Дніпра

Таблиця 3

Розподіл технічно можливого гідроенергетичного потенціалу за суббасейнами району басейну річки Дніпро

№	Назва суббасейну	$E_{ЗГП}$, кВт	$E_{ЕКГП}$, кВт	% від $E_{ЗАГ}$, кВт	$E_{ТМГП}$, кВт	% $E_{ТМГП}$від $E_{ЗГП}$, кВт
1	Суббасейн Середнього Дніпра	154271	64762	42	30647	20
2	Суббасейн Нижнього Дніпра	38269	16038	42	3783	10
3	Суббасейн річки Прип'ять	241557	63334	26	17938	7
4	Суббасейн річки Десна	138803	99097	71	51214	37
Разом по району басейну річки Дніпро		**572900**	**243231**	**43**	**103582**	**18**

У межах суббасейну Нижнього Дніпра загальні втрати потенціалу в середньому коливаються в межах 28–48 %. До басейнів, які були виключені з розрахунку ще на етапі врахування екологічних втрат потенціалу, додались ще басейни таких річок, як Орель, Мокра Сура, Базавлук та Інгулець (Obodovskiy et al., 2020) (табл. 3). Таким чином, сумарний технічно можливий потенціал річок суббасейну Нижнього Дніпра становить 3783 кВт, що дорівнює лише 10 % від загального гідроенергетичного потенціалу суббасейну.

Щодо суббасейну р. Прип'ять, то потужності технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок правобережжя басейну Прип'яті (в межах України) надзвичайно сильно відрізняються від показників ЗГП. За даними табл. 3 водотоки басейну Прип'яті мають здатність забезпечити лише 7,4 % від сумарної загальної гідроенергетичної потенціальної потужності 17938 кВт. Найбільших втрат гідроенергетичних потужностей зазнають водотоки басейнів річок Тур'ї, Коростянки, Стоходу та Веселухи. На цих територіях поширення карстових процесів, заболоченості та щільної мережі меліоративних каналів створюють несприятливі умови для розвитку гідроенергетичної галузі.

Щодо суббасейну р. Десна, то потужності технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок мають здатність забезпечити 37 % від сумарної загальної гідроенергетичної потенціальної потужності 51214 кВт. Найбільших втрат, окрім тих, які були вже виключені з розрахунків при врахуванні екологічно обґрунтованих втрат, зазнають водотоки басейнів річок Рогізна, Знобівка, Шостка, Осота (табл. 3). Найбільший відсоток цих втрат на вказаних річках припадає на втрати потенціалу через похили русел та ширину заплави.

Варто зазначити, що загалом за суббасейнами району басейну річки Дніпро енергія технічно можливого гідроенергетичного потенціалу становить лише 18 % від $E_{ЗГП}$. А загальні втрати гідроенергетичного потенціалу річок району басейну річки Дніпро, із врахуванням втрат на енергію екологічного гідроенергетичного потенціалу, становили 346813 кВт, що відповідає 61 % від ЗГП. Інакше кажучи, придатними до використання, з урахуванням всіх потенційних втрат і ризиків, можна вважати 226087 кВт (39 % від ЗГП).

Таким чином, найбільші втрати загального гідроенергетичного потенціалу притаманні річкам суббасейнів Прип'яті та Нижнього Дніпра і становлять 7 та 10 % відповідно від його величини, а найменші характерні для річок суббасейну Десни – 37 % від ЗГП. Отримані результати можуть стати в нагоді під час проєктування нових гідроенергетичних споруд на вказаних річках як джерел альтернативної енергії.

Дискусія і висновки

Обґрунтовано поняття технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок, який можна визначити із загальної схеми встановлення гідроенергетичного потенціалу для річок України. Представлено вираз для встановлення технічно можливого гідроенергетичного потенціалу як різницю між енергією екологічного гідроенергетичного потенціалу та енергією ризиків, пов'язаних із втратами водних ресурсів, небезпечними геологічними та гідрогеологічними процесами, небезпечною екзогенною діяльністю, антропогенним впливом тощо. Використано експертну оцінку основних ризиків, серед яких виокремлено сім основних, які можна застосувати для рівнинних річок України і, зокрема, для річок району басейну річки Дніпро: наявність розгалужених типів русел річок ($E_{РУСЛ}$); похили річок і ширина заплави ($E_{ЗАП}$); ерозія ґрунтів, заболоченість (екзогенні процеси), ($E_{ЕКЗО}$); карст ($E_{КАРСТ}$); зарегульованість стоку та меліорація територій ($E_{ЗМ}$); відсутність комунікацій та ЛЕП ($E_{КЛЕП}$); селитебне навантаження та інша господарська діяльність ($E_{СНГД}$). Визначено ризики дії на зменшення ЗГП кожного з них та їхній сумарний вплив. Ці критерії встановлюються для кожної ділянки річки і для річки в цілому.

Для району річкового басейну Дніпра загальна кількість ділянок дослідження, розташованих на 788 річках, становила 1704. Критеріями відбору річок були площі водозбору, обрані не меншими за 100 км^2, з витратами води понад 0,3 м^3/с.

За запропонованими підходами було розраховано величини технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок району басейну річки Дніпро за окремими річками (переважно притоки першого та другого порядків) та суббасейнами. Для річок указаного району басейну було створено карту розподілу технічно можливого гідроенергетичного потенціалу. Отримані результати засвідчили, що найбільший відсоток втрат технічно можливого потенціалу притаманний Прип'яті, Стоходу та Самарі і коливається в межах 48–58,5 %. Тут провідну роль відіграють похили та заболоченість. Найменші показники цих втрат характерні для річок Супій, Ірклій, Ствига та Уж і змінюються від 23 до 25 %. Пріоритетними тут є втрати, зумовлені заболоченістю та меліорацією території заплав.

Загалом за суббасейнами річок району басейну річки Дніпро енергія технічно можливого гідроенергетичного потенціалу становить лише 18 % від $E_{ЗГП}$. А загальні втрати гідроенергетичного потенціалу річок району басейну річки Дніпро, із врахуванням втрат на енергію екологічного гідроенергетичного потенціалу, становили 346813 кВт, що відповідає 61 % від ЗГП. Інакше кажучи, придатними до використання, з урахуванням всіх потенційних втрат і ризиків, можна вважати 226087 кВт (39 % від ЗГП).

Внесок авторів: Олександр Ободовський – концептуалізація досліджень стосовно гідроенергетичного потенціалу, алгоритму встановлення гідроенергетичного потенціалу річок, розроблення методики встановлення та створення експертних оцінок дослідження технічно можливого гідроенергетичного потенціалу, аналіз отриманих результатів, написання та редагування статті; Костянтин Данько – участь у розробленні методики встановлення технічно можливого гідроенергетичного потенціалу, розрахунки цього потенціалу для річок правобережжя Дніпра; Олена Почаєвець – участь у розробленні алгоритму встановлення гідроенергетичного потенціалу річок, валідація даних, розрахунки потенціалу для річок басейну Дніпра, застосування ГІС-технологій для створення карти розподілу технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок басейну Дніпра, перегляд та технічне оформлення статті; Наталія Корогода – розрахунки технічно можливого гідроенергетичного потенціалу для річок лівобережжя Дніпра, валідація даних, технічне оформлення статті; Василь Гребінь – застосування басейнового принципу у визначенні технічно можливого гідроенергетичного потенціалу річок, написання (перегляд і редагування) статті.

Список використаних джерел

Архипова, Л. М. (2011). *Природно-техногенна безпека гідроекостистем.* ІФНТУНГ.

Бриль, А. О., Васько, П. Ф., & Мороз, А.В. (2019). Технічний потенціал гідроенергетичних ресурсів малих річок України з урахуванням природоохоронних обмежень. *Гідроенергетика України,* 3–4, 47–51.

Гаврилюк, Р. Б., & Веремійчик, Г. К. та ін. (2018). *Гідроенергетичний потенціал річок України: розвінчання міфів.* Фенікс.

Кудря, С. О. (Ред.). (2020). *Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України*. Інститут відновлюваної енергетики НАН України.

Лук'янець, О. І., Ободовський, О. Г., Гребінь, В. В., Почаєвець, О. О., & Корнієнко, В. О. (2021). Просторові закономірності зміни середнього річного стоку води річок України. *Український географічний журнал,*1, 6–14. https://doi.org/10.15407/ugz2021.01

Ободовський, О. Г. (2001). *Гідролого-екологічна оцінка руслових процесів (на прикладі річок України)*. Ніка-Центр.

Ободовський, О. Г., Данько, К. Ю., & Почаєвець, О. О. (2017). Загальний енергетичний потенціал річок Українських Карпат. *Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Географія,* 1(66), 15–29. http://doi.org/10.17721/1728-2721.2017.66.2

Ободовський, О. Г., Данько, К. Ю., Сніжко, С. І., & Онищук, В. В. (2019). Гідроекологічна оцінка та прогноз гідроенергетичного потенціалу річок Правобережжя басейну Дніпра (в межах України). У В.І. Осадчий, Л.О. Горбачова, О.Г. Ободовський та ін. (Ред.), *Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології,* с. 39–57. Ніка-Центр.

Ободовський, О. Г., Онищук, В. В., & Почаєвець, О. О. (2019). Перспективи використання гідроенергетичного потенціалу на річках басейну Дніпра (на прикладі р. Рось). *Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Геологія,* 1(84), 56–62.

Ободовський, О., Данько, К., Почаєвець, О., & Ободовський, Ю. (2016). Методика встановлення гідроенергетичного потенціалу річок (на прикладі річок Українських Карпат). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка,* 1(64), 5–12. http://doi.org/10.17721/1728-2721.2016.64.1

Ободовський, Ю. О., Хільчевський, В. К., & Ободовський, О. Г. (2018). *Гідроморфоекологічна оцінка руслових процесів річок верхньої частини басейну Тиси (в межах України).* Прінт-сервіс.

Онищук, В. В., & Ободовський, О. Г. (11.12.2017). Високоекологічна гідроелектростанція. *Патент України на корисну модель № 121730. Опубл. Бюл. № 23, 2017.*

Руденко, Л. Г. (Ред.). (2007). *Національний атлас України.* ДНВП "Картографія".

Рудько, Г. І., & Консевич, Л. М. (1998). *Наукові засади екологічної оцінки та оптимального використання гідроресурсів Карпатського регіону.* Знання.

Хільчевський, В. К., & Гребінь, В. В. (2017). Гідрографічне та водогосподарське районування території України, затверджене у 2016 р. – реалізація положень ВРД ЄС. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія,* 1(44), 8–20.

Цепенда, М. М. (2009). Методичні особливості економіко-географічної оцінки гідроенергетичного потенціалу Середнього Придністров'я. *Наук. записки Вінницького держ. пед. ун-ту ім. М. Коцюбинського. Серія Географія,* 18, 211–219.

Яцик, А. В., Бишовець, Л. Б., & Богатов, Є. О. (1991). *Малі річки України.* Урожай.

Kryvets, O., Obodovskyi, O., & Pochaievets, O. (2022). Determination of the ecological hydropower potential of Ukrainian rivers. *XVII International Scientific conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment" 7–10 November, 2022, Kyiv,* p. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520043

Obodovskiy, O. G., Danko, K. Yu., Pochayevets, O. O., Onyshchuk, V. V., Snizhko, S. I., & Lukyanets, O. I. (2020). Methodic Aspects of Hydroecological Assessment of Hydropower Potential of the Plain Rivers' (by Example of Dnieper Right-Bank Rivers). *Hydrobiological Journal,* 56(4), 84–102. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v56. i4.70.

Obodovskyi, O. (Ed.). (2020). *River Runoff in Ukraine Under Climate Change Conditions.* LAP Lambert Academik Publishing.

Obodovskyi, O. (Ed.). (2021). *Hydropower Potentional Assessement: mountain rivers of Ukrainian Carpathians.* LAP Lambert Academik Publishing.

References

Arkhypova, L. M. (2011). *Natural and technological safety of hydroelectric systems*. IFNTUOG [in Ukrainian].

Bryl, A. O., Vasko, P. F., & Moroz, A. V. (2019). The technical potential of hydropower resources of small rivers of Ukraine, taking into account environmental restrictions. *Hydropower of Ukraine*, 3–4, 47–51 [in Ukrainian].

Cependa, M. M. (2009). Methodological features of the economic and geophysical assessment of the hydropower potential of the Middle Transnistria. *Scientific Notes of Vinnytsia State Pedagogical University named after M. Kotsiubynskyi. Geography Series*, 18, 211–219 [in Ukrainian].

Havryliuk, R. B., & Veremiychyk, G. K. et al. (2018). *Hydropower potential of Ukrainian rivers: debunking myths*. Phoenix [in Ukrainian].

Khilchevskyi, V. K., & Grebin, V. V. (2017). Hydrographic and water management zoning of the territory of Ukraine, approved in 2016 – implementation of the provisions of the EU WFD. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 1(44), 8–20 [in Ukrainian].

Kryvets, O., Obodovskyi, O., & Pochaievets, O. (2022). Determination of the ecological hydropower potential of Ukrainian rivers. *XVII International Scientific conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment" 7–10 November, 2022, Kyiv,* p. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520043

Kudria, S. O. (Ed.). (2020). *Atlas of energy potential of renewable energy sources of Ukraine*. Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine [in Ukrainian].

Lukianets, O. I., Obodovskyi, O. G., Grebin, V. V., Pochaievets, O. O., & Korniienko, V. O. (2021). Spatial regularities of change in average annual water flow of rivers of Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal,* 1, 6–14. https://doi.org/10.15407/ugz2021.01 [in Ukrainian].

Obodovskiy, O. G., Danko, K. Yu., Pochayevets, O. O., Onyshchuk, V. V., Snizhko, S. I., & Lukyanets, O. I. (2020). Methodic Aspects of Hydroecological Assessment of Hydropower Potential of the Plain Rivers' (by Example of Dnieper Right-Bank Rivers). *Hydrobiological Journal,* 56(4), 84–102. http://doi.org/10.1615/HydrobJ.v56. i4.70

Obodovskiy, O., Onischuk, V., & Pochaievets, O. (2019). Perspectives of the usage of hydropower potential of the rivers of the Dnipro river basin (on the example of the Ros river). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 1(84), 56–62 [in Ukrainian].

Obodovsky, O. G. (2001). *Hydrological and ecological assessment of riverbed processes (on the example of Ukrainian rivers)*. Nika-Centre [in Ukrainian].

Obodovskyi, O. G., Danko, K. Y., Snizhko, S. I., & Onyshchuk, V. V. (2019). Hydroecological assessment and forecast of the hydropower potential of the rivers of the Right Bank of the Dnipro Basin (within Ukraine). In V.I. Osadchiy, L.O. Gorbacheva, O.G. Obodovsky et al. (Eds.). *Problems of hydrology, hydrochemistry, hydroecology*, pp. 39–57. Nika-Centre [in Ukrainian].

Obodovskyi, O., Danko, K., Pochaievets, O., & Obodovskyi, Yu. (2016). Methods of assessment hydropower potential of the rivers (the example of Ukrainian Carpathians rivers). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography*, 1(64), 5–12. http://doi.org/10.17721/1728-2721.2016.64.1 [in Ukrainian].

Obodovskyi, Yu. O., Khilchevskyi, V. K., & Obodovskyi, O. G. (2018). *Hydromorphological and ecological assessment of riverbed processes in the upper part of the Tisza basin (within Ukraine)*. Print service [in Ukrainian].

Obodovskyi, O., Danko, K., & Pochaievets, O. (2017). The total hydropower potential of the Ukrainian Carpathians Rivers. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography*, 1–2(66–67), 15–29. http://doi.org/10.17721/1728-2721.2017.66.2 [in Ukrainian].

Obodovskyi, O. (Ed.). (2020). *River Runoff in Ukraine Under Climate Change Conditions.* LAP Lambert Academik Publishing.

Obodovskyi, O. (Ed.). (2021). *Hydropower Potentional Assessement: mountain rivers of Ukrainian Carpathians.* LAP Lambert Academik Publishing.

Onyshchuk, V..V., & Obodovsky, O. G. (11.12.2017). Highly environmentally friendly hydroelectric power station. *Patent of Ukraine for utility model No. 121730. Publication Bulletin No. 23, 2017* [in Ukrainian].

Rudenko, L. G. (Ed.). (2007). *National atlas of Ukraine*. Kartografiya [in Ukrainian].

Rudko, G. I., & Konsevych, L. M. (1998). *Scientific principles of ecological assessment and optimal use of hydro resources in the Carpathian region*. Znannya [in Ukrainian].

Yatsyk, A. V., Byshovets, L. B., & Bogatov, E. O. (1991). *Small rivers of Ukraine*. Urozhay [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 21.09.24
Прорецензовано / Revised: 20.11.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Oleksandr OBODOVSKIY[1], DSc (Geogr.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5472-3222
e-mail: obodovskiy58@gmail.com

Kostiantyn DANKO[2], PhD (Geogr.)
ORCID ID: 0000-0002-6060-9657
e-mail: kostiantyn.danko@gmail.com

Olena POCHAIEVETS[1], PhD (Geogr.)
ORCID ID: 0000-0003-4521-9922
e-mail: olena.pochaievets@knu.ua

Nataliia KOROHODA[1], PhD (Geogr.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0003-1518-2997
e-mail: nkorogoda@knu.ua

Vasyl GREBIN[1], DSc (Geogr.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8197-607X
e-mail: grebin1964@gmail.com

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[2]Ukrainian Hydrometeorological Institute, Kyiv, Ukraine

METHODOLOGICAL ASPECTS AND RESULTS OF DETERMINING THE TECHNICALLY POSSIBLE HYDROPOWER POTENTIAL OF UKRAINIAN RIVERS (ON THE EXAMPLE OF THE DNIPRO RIVER BASIN)

Background. ***Diversification of electricity generation sources is gaining considerable attention in Ukraine today. This is especially true when the russian aggressors put out of commission the power generating capacities of thermal power plants and large hydroelectric power plants. In this context, the use of alternative (renewable) energy sources, in particular small hydropower, becomes important. That is why it is important to study the technically possible hydropower potential of rivers.***

Methods. ***The rationale for and the size of the technically feasible hydropower potential of rivers can be determined from the general scheme for determining the potential for rivers in Ukraine that we have proposed. For this purpose, an expert assessment of the main risks that may reduce the overall hydropower production was carried out.***

Results. ***It has been established that the largest percentage of losses of technically possible potential, relative to the total hydropower potential (THP), is inherent in the basins of the Pripyat, Stokhid and Samara rivers and ranges from 48–58.5 %. The slopes of river channels and waterlogging of their catchments play a key role here. The lowest rates of these losses are typical of such rivers as the Supiy, Irkliy, Stvyha and Uzh, and vary from 23 to 25 %. The priority here is losses caused by waterlogging and reclamation of floodplains.***

Conclusions. ***Taking into account all potential losses and risks, 226087 kW (39 %) of the total hydropower potential of the studied rivers can be considered suitable for use.***

Keywords: ***technically possible hydropower potential, river energy, Dnipro River basin region, risk assessment, map.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results

UDC 550.4:[502.51(262.5):678.7-022.53-036.5]
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.13

Volodymyr IEMELIANOV[1], DSc (Geol. & Mineral.)
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-8972-0754
e-mail: volodyasea1990@gmail.com

Yevhen NASIEDKIN[1], PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0003-2633-9291
e-mail: nasedevg@ukr.net

Tamara KUKOVSKA[1], PhD (Geol. & Mineral.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-7532-8885
e-mail: t.kukovska@gmail.com

Tetiana KOSHLIAKOVA[2], PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-8551-3531
e-mail: tatianakoshliakova@gmail.com

Natalia FEDORONCHUK[1], PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-4903-4928
e-mail: fedoronch@gmail.com

Ihor SHURAIEV[1], PhD (Geol.)
ORCID ID: 0000-0002-6289-8632
e-mail: igorshuraev91@gmail.com

Volodymyr YUKHYMCHUK[3], DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5218-9154
e-mail: v.yukhymchuk@gmail.com

[1]State Scientific Institution "Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine
[2]M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[3]V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

EXPLORING THE MICROPLASTICS DISTRIBUTION IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE WESTERN BLACK SEA

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

Background. *The spread and accumulation of plastic waste in the environment is now a recognized global problem. The development of an effective strategy for managing plastic waste and minimizing its impact on the marine environment is not possible without conducting field studies in bottom sediments. Determination of their content in the upper layer of precipitation and study of qualitative and quantitative characteristics will allow to outline the patterns of their entry into the water area, distribution and accumulation, risks of impact on marine organisms.*

Methods. *Visual determination of microplastic particles was carried out under the monocular of SIGETA MB-12 LCD optical microscope. An alternative method of identification, the hot needle test, was also used to determine plastic under the microscope. Raman spectroscopy was used to perform structural identification. Laboratory studies were performed using a single-stage MDR-23 spectrometer equipped with a cooled CCD detector and a Micromed microscope.*

Results. *The analysis of each sample and subsequent generalization showed the presence of plastic particles at all points of the sampling area, in different quantities and composition. The results of our studies confirm that microplastic particles in the surface sediments are quite abundant throughout the entire research area, and they are represented by different types everywhere, with fibers dominating in terms of morphological characteristics and polyethylene and polypropylene in terms of chemical types. There is no stable dependence of redistribution of microplastics of different densities on distance from the shore. The only thing that can be confirmed is uneven lateral distribution within the shelf zone, which is quite possibly related to the impact of the anthropogenic plane load on the surface bottom sediments.*

Conclusions. *Studies have shown that microplastic particles in the surface sediments are quite abundant throughout the survey area, and they are represented by different types everywhere, with fibers dominating in terms of morphological characteristics. As for the distribution of microplastics in surface sediments depending on natural conditions, we can document the fact that the amount of polymers, in terms of dry weight of soil matrix samples, increases in the direction of the mainland slope. An important result of the work was the identification of a number of topical issues, shortcomings and uncertainties in laboratory research methods, sample preparation and identifying microplastics, which should be addressed in the future.*

Keywords: *microplastics, bottom sediments, research methods, ecology, spectroscopy, visual examinations.*

Background

The spread and accumulation of plastic waste in the environment is now a recognized global problem (PlasticEurope, 2018; Geyer, Jambeck, & Law, 2017; Hoornweg, & Bhada-Tata, 2012). As with many other types of pollutants, the final link in their accumulation is the water layer, and subsequently the bottom sediments of water areas, including the seas. At the same time, the patterns of distribution of artificial polymers in water areas are mostly natural, and are determined by hydrochemical, hydrological and, in part, hydrobiological conditions. The main factors of anthropogenic impact are the nature and intensity of the sources of pollutants and their chemical composition (in particular, the density indicators and the propensity of polymers to decompose under certain conditions).

For ecosystems of water areas, microplastics (MP) are considered the most dangerous in terms of dimension – the degradation products of plastic waste (Wright, & Kelly, 2017; Kershaw, Turra, & Galgani, 2019; Andredy, 2017; Lambert, & Wagner, 2016). Contamination of surface bottom sediments with microplastics is a potential natural hazard, and their distribution in the geological component of marine environments is the subject of important scientific research (Hidalgo-Ruz et al., 2012; Andrady, 2011; Kershaw, Turra, &

Galgani, 2019; Guidance on Monitoring..., 2013). The development of an effective strategy for managing plastic waste and minimizing its impact on the marine environment is not possible without conducting field studies in areas of their final accumulation, i.e. bottom sediments. Determination of their content in the upper layer of precipitation and study of qualitative and quantitative characteristics will allow to outline the patterns of their entry into the water area, distribution and accumulation, risks of impact on marine organisms.

Research location, station network and sampling methods

The State Scientific Institution "MorGeoEcoCenter of the National Academy of Sciences of Ukraine" within the framework of the international DOORS project carried out a study of microplastics in the bottom sediments of the water area within the Romanian shelf and part of the mainland slope of the Black Sea (Fig. 1), with the possibility of going to sea and sampling bottom sediments in 2023 due to the international DOORS research project ("Developing Optimal and Open Research Support for the Black Sea". The expedition was carried out on board the research vessel Mare Nigrum of the Romanian National Institute of Marine Geology and Geoecology (GeoEcoMar). Below is a diagram of location of the stations on the shelf and mainland slope of the study area (Fig. 1)

It is known that the Black Sea is the most vulnerable and exposed to various pollution, given its status as an inland semi-enclosed sea body with a strong influence of runoff from rivers with large catchment areas – the Danube, Dnipro, Southern Bug, as well as desalinated water from the Azov Sea through the Kerch Strait. The western part of the Black Sea is mainly influenced by the Danube River runoff, a powerful source of anthropogenic substances, including plastic waste from drained land areas. The study area is hydrologically determined by the influence of these water massifs, and the mineral, organic and anthropogenic suspended solids brought by them partially reach the study area and participate in sedimentation processes. It should be noted that the volume and intensity of MT, according to publications by foreign experts, are also largely regulated by the contribution of rivers, as the main source of microplastics for marine ecosystems, and at the same time the most saturated way of transporting plastic to the seas (Duis, & Coors, 2016; Lebreton et al., 2017; Faure et al., 2015; Schmidt et al., 2018).

The layout of the stations within the specified area allowed testing various elements of the underwater terrain: shelf and continental slope (including the sides of the Mangali submarine-canyon system). Sampling from the vessel was carried out in the water depth range from 25 to 1080 m along a defined network of profiles using a Multi Corer (Mark II) sampler into 4 core tubes (10 cm diameter), 25 % of the samples for further comparison of sampling methods were collected using a Van-Veen Grab (Hydro-Bios KIEL, 35 x 40 cm opening). For the analysis of microplastics, the surface and near-surface layer of bottom sediments having a thickness of 5 cm was selected. Samples were taken into aluminum containers, stored and transported to the laboratory at the temperature of –18°C. A total of 19 samples were collected for laboratory testing.

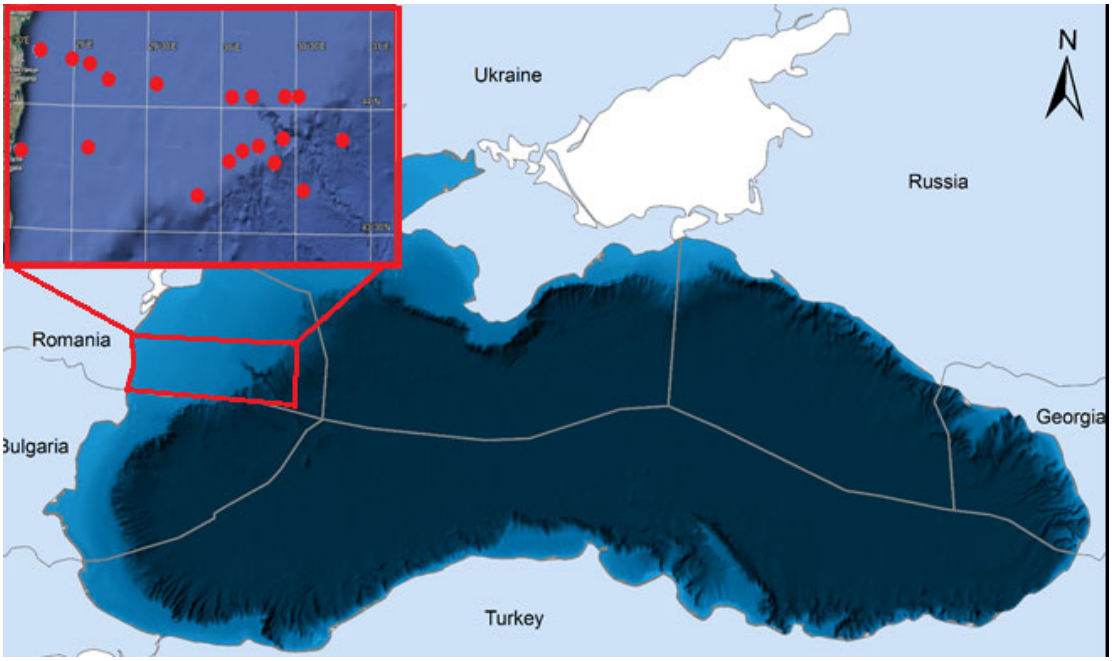


Fig. 1. Map of the study area with bottom surface relief elements and sampling points indicated

Precautions were also taken during the sampling process to avoid background plastic contamination through the air. Since the weight of the samples fluctuated significantly depending on their water content, the analysis results were subsequently recalculated using the dry weight of sediment. The methodology of the analytical studies carried out at the SSI "MorGeoEcoCenter of the National Academy of Sciences of Ukraine" was as close as possible to the relevant guidelines, in particular (Guidance on the Monitoring…, 2023; Kershaw, Turra, & Galgani, 2019; Hanke et al., 2013; Guide to microplastic identification, 2012; Masura et al., 2015), but had certain adjustments related to the nature of mechanical and mineral composition of the samples, the technical capabilities of laboratory equipment and practical skills regarding the effectiveness of certain sequences of separation of MPs from sediment samples.

The sample preparation procedure included: drying without preliminary sifting through sieves, flotation in a zinc chloride solution and selection of the lightest component, repeated precipitation and division in a separation funnel,

aging in hydrogen peroxide, and treatment with isopropyl alcohol. Each of the stages of sample preparation required certain conditions, the time range of sample exposure. At the end of each procedure, samples were washed in distilled water and dried (McDermid, & McMullen, 2004). Given the density of the most used categories of plastic polymers (ranging from 0.8 to 1.4 g/cm^3) and the precipitation matrix (more than 2.5 g/cm^3), our studies used a solution to separate the mineral component and microplastic particles using zinc chloride (at the density of 1.8 g/cm^3). Minimization of the natural organic component of the suspended matter was achieved by settling in a concentrated solution of hydrogen peroxide 35 % (Liebezeit, & Dubaish, 2012; Imhof et al., 2012; Nuelle et al., 2014).

Filtration processes at each stage of sample preparation were carried out, due to certain technical capabilities and technological limitations, through a filter polyamide cloth with a cell diameter of 26 µm. This is in line with the microplastics recommended for measurement provided in Guidance on the Monitoring of Marine Litter in European Seas, 2023. Also, due to the use of a polyamide fiber filter during laboratory work, transparent linear objects that corresponded to the parameters of the filter fibers were not included in the results of microplastics counting. The direct process of determining pollutants was based on two stages:

1) visual characteristics using optical devices (microscope, magnifying glass, etc.),

2) physicochemical characteristics using hardware complexes for probable fragments of MP that need to be confirmed.

Visual determination of microplastic particles was carried out under the monocular of SIGETA MB-12 LCD optical microscope, which is designed to work in wide or mixed light with magnification of 40x–640x with 4x, 10x, 40x lens objectives and interchangeable attachments. Evaluation under the microscope was carried out according to a number of methods presented in the literature (Kershaw, Turra, & Galgani, 2019; Hanke et al., 2013; Blair et al., 2019; Vermeiren et al., 2020; Mariano et al., 2021). The main indicators-identifiers were color, linear size ratio and particle morphology. Color was also one of the main characteristics during the visual identification of plastics. An alternative method of identification, the hot needle test, was also used to determine plastic under the microscope (De Witte et al., 2014).

Raman spectroscopy was used to perform structural identification (in fact, to verify the results of optical studies). Laboratory studies were performed using a single-stage MDR-23 spectrometer equipped with a cooled CCD detector (Andor iDus 420, Great Britain) and a Micromed microscope. Raman spectra were excited by radiation from solid-state lasers with wavelengths of 457 nm, 532 nm, 671 nm, and 785 nm. In order to prevent thermally induced modification of the samples during their examination, the laser power density on the samples was less than 10^3 W/cm^2. Spectral resolution of the spectrometer was determined by the width of the phonon band from the silicon monocrystalline substrate and was 3 cm^{-1} when the spectra were excited by laser radiation with λ=457 nm and 1.5 cm^{-1} when the spectra were excited by radiation with λ=785 nm. The frequency position of the phonon band from Si (521.0 cm^{-1}) was used as a reference to determine the frequency position of the other Raman bands.

Methods

On average, the fixed total number of solid matter fragments of mineral, organic, and anthropogenic origin with dimensions from 1000 to 26 µm in the processed samples exceeded 200 pieces on average, and the selection of potential MP fragments less than 300 µm from the total particle array was difficult. Among other things, this is due to the fact that at density of the separation solution of 1.8 g/cm^3 they float to the surface, in addition to plant/animal particles and artificial polymers, some organic and mineral aggregates, coal fragments, and even loose carbonate formations of varying degrees of decomposition, probably of organic origin (Fig. 2).

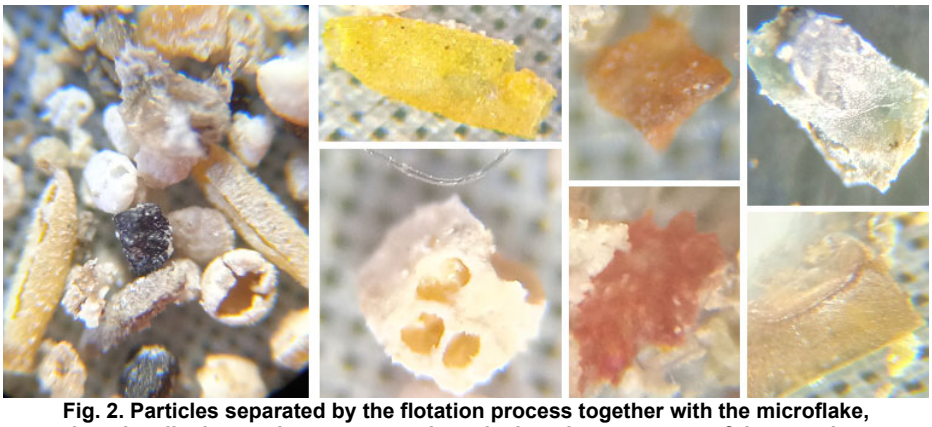


Fig. 2. Particles separated by the flotation process together with the microflake, but visually detected as organogenic and mineral components of the samples

The procedure of visual counting and hardware confirmation was based on a number of methodological guidelines, one of the most up-to-date of which was the Guidance on the Monitoring of Marine Litter in European Seas, 2023. For the study, control samples were selected in groups from different specimens in order to reach the 20 units or 10 % of the total content specified by the methodology. Accordingly, several representative groups were formed, represented by a sample of different morphological and color assemblages, which will be described below, to verify them using Raman spectroscopy. This made it possible to statistically process the data and determine the percentage of error for each type of particles studied by color and morphological category. If the identity of some of its components was not confirmed, the percentage of the latter in the control group was considered the error factor by which the recalculation was performed. In general, the procedure for working with samples can be described as follows (Fig. 3).

The comparative unit was 200 grams of dry sediment, with a mandatory note on the weight ratio of dry and wet samples.

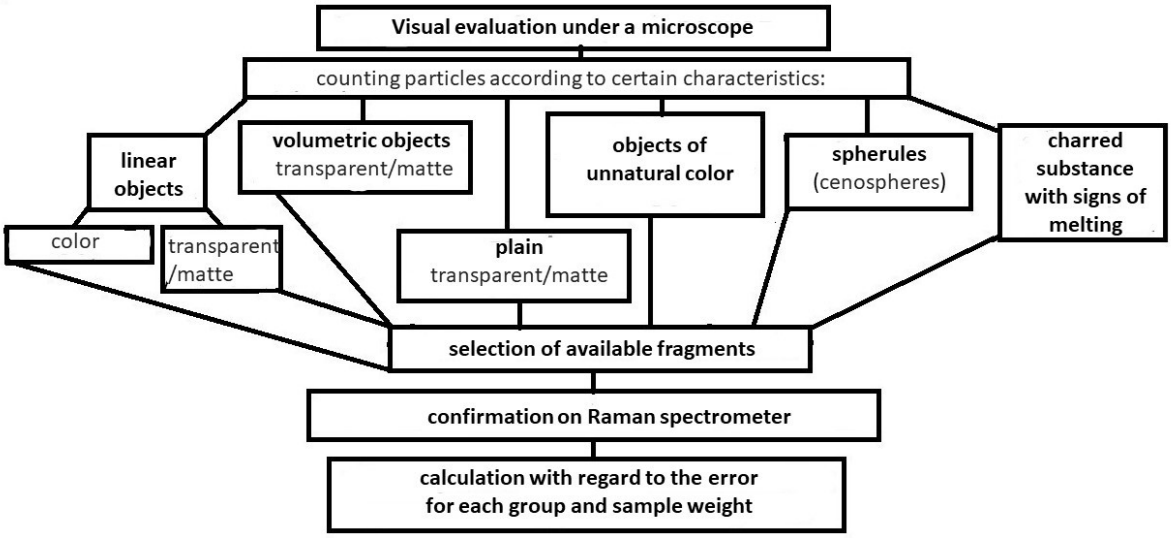


Fig. 3. Schematic view of the types, stages of detection and verification of MP particles in prepared samples

Results

Optical examinations under the microscope showed that all particles visually identified as plastic can be grouped according to morphological features. Visual assessment under the microscope was carried out according to a number of methods presented in the literature (Guide to microplastic identification, 2012; Blair et al., 2019; Vermeiren et al., 2020; Mariano et al., 2021); the main identifying indicators were color, linear size ratio and particle morphology. Data on the main morphological classes of particles recommended for classification by the international methodology were used (Guidance on the Monitoring…, 2023). At the same time, these recommendations were adjusted and expanded in accordance with the regional features of the sampling area and the types and characteristics of particles that were identified and verified on the Raman spectroscope. In particular, the polymer component was divided into the following groups according to the external features:

1. *A group of linear objects* in which the length was significantly greater than the diameter (of fibers). The following criteria were used to determine the elongated MP particles, which are generally presented in all methodological literature: absence of cellular or organic structures in the fiber, uniform thickness, no tapering towards the ends, and three-dimensional bending. The "hot needle" method was also used for verification, for which it was the most achievable category in terms of fragment size. The approximate percentage of the polymer component, which was confirmed by the methods of "hot needle" and spectroscopy, was for colored fragments – 60 %, colorless (transparent, white, matte) – less than 30 %. As a rule, a group of linear objects is present in all the samples studied and is represented by polyester, polypropylene, and polyamide. In most cases, the length reaches 100–2000 μm, in cross-section – 10–20 μm, less often – up to 40–70 μm. In some cases, spectroscopy did not give a positive result due to intense luminescence, and the overall ratio of the sample to the polymer group was confirmed by the hot needle test (Fig. 4).

2. *Colored objects* of an atypical shape for natural particles, visually captured as fragments of artificial entities. The main indicator is a saturated unnatural color (pink, blue, green) and morphological parameters that are non-typical for natural particles. The size, as a rule, is from 20 μm to 300 μm, less often – up to 1.5 mm. They are found infrequently, with an average of one to two fragments per sample (in some samples, monotypic particles of several units are found, which probably indicates the decomposition of one larger object during the period of stay in the sediments or mechanical impact during mixing). As studies have shown, the particle color is of considerable importance, same as during the determination of linear objects. In particular, yellow, brown, pale red, and orange colors can correspond to animal remains (root fragments, chitinous or other particles of exoskeletons, shells, etc.) much more often than particles of other colors. This color category was not included in the MP count, although some particles turned out to be polymer fragments. Approximate percentage of the polymer component is 60 % for the first color group (green, red, blue, pink fragments). MPs, as a rule, represent polypropylene, polystyrene and polyethylene, two cases each – polyurethane and polyethylene terephthalate.

3. *Flat particles* – matte or transparent particles that are turned transparent by the lower illumination of the microscope. Ranked second in their prevalence after fibers. The particles have a significant range of dimensions – from 20 μm to 2–3 mm, on average – 20–400 μm. A fragment of the largest dimension was captured in sample No. 15 – a 2.3 mm long transparent polypropylene film. The film, by the way, was extremely non-resistant to mechanical stress, dividing into a large number of fragments. As a rule, flat particles can be subdivided into two types – the first is shapeless thin and elastic film of varying degrees of transparency with torn edges, the second is transparent or matte scales with a certain structure and type of cracking. The confirmed percentage of the polymer component is 40 %, the highest flaw in the identification process on the Raman spectrometer remains a high degree of luminescence. This group is mainly represented by polyethylene, polypropylene, some individual objects – by polychlorovinyl.

4. *Bulk (volumetric) particles* are represented by fragments that are not visible under the lower illumination of the microscope, or usually have comparable dimensions in three projections. They – are available in transparent and matte surfaces, with a wide range of sizes from 26 microns to 900 microns. This category is also characterized, as for minerals, by different types of gloss – glass, greasy and opaque. They have different structure and degree of surface rusting and fracture, mainly shell-shaped and flat. The percentage of particles verified in the sample for this category also reaches 40 %.

Fig. 4. Representative fragments visually fixed as representatives of different groups of synthetic polymers: by rows – linear objects, colored fragments, flat particles, bulk particles, spherules, substance with traces of high-temperature processes

5. *Spherules, balls* – a category that is commonly found in samples, with dimensions ranging from 20 μm to 120 μm, with an average of 70 μm. Usually, objects of spherical shape are subject to consideration and counting. Others, in particular those that had an oval shape and were represented in larger quantities, were not taken into account. In terms of size, color, and insolubility in hydrogen peroxide, they were similar to fragments of biological origin, in particular, the shells of organisms at different stages of life. The spheres usually had colors ranging from transparent to dark brown, and varying degrees of rusting and shape defects. The percentage of confidence is low – less than 30 %, and a big problem is the separation of spheres from samples for analysis on spectrometer. If the spherules turned out to be cenospheres (hollow), then they were not counted, as were the objects of light brown, yellow, and white color. The approximate percentage of verified particles from those sampled was not more than 30 %.

6. The allocation of such a category of MP as a *substance with traces of exposure to high-temperature processes* is associated with the detection of fragments that are similar in shape and color to charred particles with different shine and breakage, for which diagnostics at different points sometimes gave different Raman spectra, some of which correspond to synthetic polymers (Fig. 5).

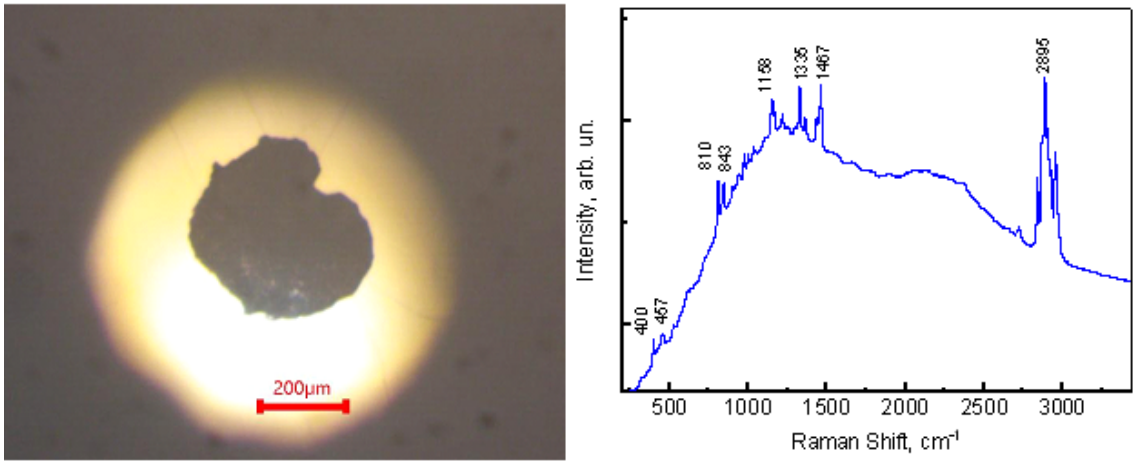


Fig. 5. A particle that looks like a burnt and melted fragment of a substance shows vibrational bands in the Raman spectrum characteristic for polypropylene

These are likely fragments of so-called pyroplastics, derivatives of synthetic polymers that have been subjected to intense temperature exposure (melted or severely softened) and subsequent mechanical destruction. This type of microplastics has attracted the attention of researchers in recent years in their publications (Ellrich et al., 2023). Partially burnt or melted polymers, which could also be subjected to erosion by waves and wind, are represented, according to the literature, by polyethylene and polypropylene.

The analysis of each sample and subsequent generalization showed the presence of plastic particles at all points of the sampling area, in different quantities and composition. The results of our studies confirm that microplastic particles in the surface sediments are quite abundant throughout the entire research area, and they are represented by different types everywhere, with fibers dominating in terms of morphological characteristics and polyethylene and polypropylene in terms of chemical types.

The minimum defined number of MP particles in the sample was 10 units per 200 grams of dry matter, and the maximum was more than 100, respectively. It should be noted that the high levels of artificial polymers for a number of samples were obtained by recalculating the amount of substance taken at different points to a single comparative value (this will be described in the discussion section). The size of the detected fragments was, on average, 100–300 microns, with individual specimens reaching 1.5–3 mm. Fibers dominated the defined categories, with pyroplastics making up the smallest category by number of units. The map and the consolidated diagram (Fig. 6, 7) present the overall data on the presence of different categories of MP in the collected samples according to the collection stations, both in terms of actual distribution and percentage of the defined categories in each sample.

There are currently few publications on the distribution, species composition, and dynamics of microplastics within the shelf and mainland slope of the western Black Sea. Despite the content of these works (Pojar et al., 2021; D'-Hont et al., 2021), in general, there is not enough information to compare and correct the data we obtained. According to the results of our research, there is no stable dependence of redistribution of microplastics of different densities on distance from the shore, similar to the distribution of the material component of sediments. The only thing that can be confirmed, based on the information received, is uneven lateral distribution within the shelf zone, which is quite possibly related to the impact of the anthropogenic plane load on the surface bottom sediments. In particular, we are talking about the location and distribution of possible dumping zones on the shelf, the impact of which caused the concentration of pollutants within certain sufficiently large areas of the shelf. This may be evidenced, in particular, by the large amount of carbon-containing substances in certain test points (stations 1, 3 – probably particles of natural coal, burnt substances, etc.).

One of the peculiarities of the microplastics content in the surface sediments of the survey area is the relative stability of their concentration (quantitative and qualitative indicators) in the sediments of the mainland slope (samples 7, 15, 16, 17, 18). It should also be noted that the low concentrations of MP at point 10 are likely related to technical problems while sampling from the vessel: during lifting of the scoop, the sediment was washed with water due to incomplete closure of the sampler flaps.

As for the planar distribution of different types of polymers, the Raman spectrometer identification procedure involved the creation of mixed control groups from different samples, which makes it impossible to calculate the types of MPs by composition at individual stations. This is due to the small size of the samples and the corresponding difficulty in sampling (particles smaller than a certain size cannot be visually distinguished from other material or sorted because they cannot be controlled due to their small size). At the same time, the analysis of the sorted part of the fragments using methods that facilitate proper plastic identification (Hidalgo-Ruz et al., 2012; Dekiff et al., 2014), is a necessary element of MPs verification and their subsequent counting.

It is worth noting certain problematic issues related to the definition of MPs and their calculation, peculiarities of field and laboratory work that could affect the quality of the results calculation, and the identification and consideration of which should improve the accuracy of the results and their informational value. They are:

1) The number of MP particles per sample unit was recalculated to dry sludge. The ratio of dry sample weight to wet sample weight for samples collected in different areas of the shelf averaged 1:2.5 and ranged from 1:1.6 (sample No. 2) to 1:10 (sample No. 18). The increase in the ratio is observed, as a rule, for samples taken with a multicorer, and in terms of the planar distribution – for samples taken at considerable depths. Perhaps this is due to the peculiarities of sampling by different types of devices (the possibility of sampling "silt" with a multicorer, or with different material composition of sediments and their saturation with water and shell/detritus material).

2) The above-mentioned problem of different sample weights creates another problem - determining the methodology for proportional conversion of the number of MP particles in samples of different volumes to one reference mass. Given the solution of such problems in the literature (D'Hont et al., 2021), it was decided, in case of different sample volumes, to reduce the number of identified particles by a proportional increase or decrease to the reference weight.

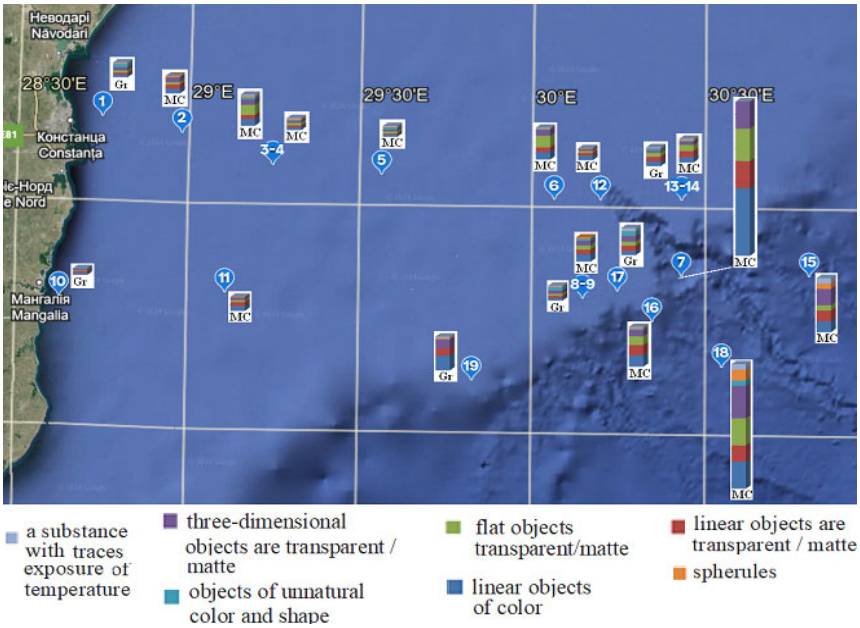


Fig. 6. A map of the study area with sampling points and diagrams of the distribution of different categories of MPs and their number. Captions under the diagrams indicate the types of samplers (multicorer, scoop)

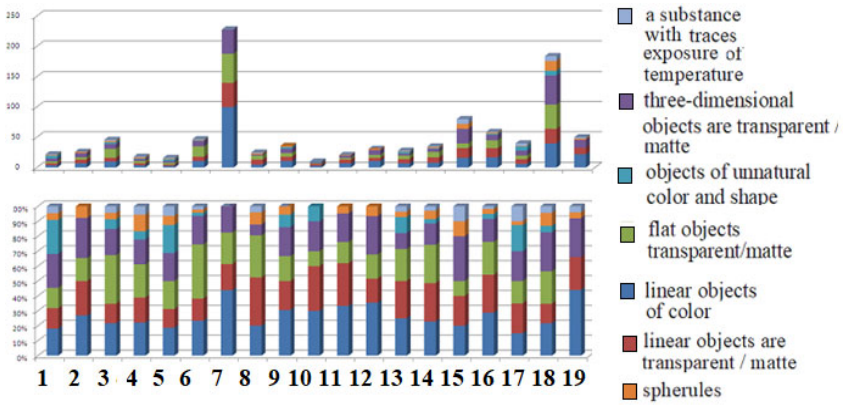


Fig. 7. Consolidated diagram of the distribution of different categories of MPs in station samples:
1) actual distribution, 2) percentage in each sample

For example, halving the amount of particles to 200 g for sample No. 8 (with 400 g removed from it for analysis) seems logical, and the feasibility of a proportional increase in the amount of MP for sample No. 18 by almost 8 times from the existing 0.026 g to 200 g remains questionable. This is especially true for rarely encountered categories of MPs – for example, 1 spherule, the probability of detection of which is insignificant, should be proportionally recalculated eight times.

3) Regarding bringing the density of zinc chloride solution to 1.8 g/cm^3, the following should be noted: with the unconditional benefit of detecting certain types of high-density MPs (polyurethane, polyesters, polyvinyl chloride), a significant amount of mineral substance (loose carbonate objects, a significant amount of carbonaceous substance, organo-mineral aggregates, etc.) may emerge during the flotation process, which introduces certain complications in the procedure for calculating or selecting MPs. Studies have shown that the aggregation of sediment fragments of the siltstone-pelite component, namely the presence of accumulations of organic-mineral particles, can remain even after liquid separation and retention in solutions to remove organic matter (in particular, H_2O_2,). This refers to the potential loss of counting artificial polymer particles remaining in the mineral matrix with a density higher than the flotation solution (Fig. 8).

Perhaps, in this case, attention should be paid to systems for defragmenting the mineral base of samples and qualitatively separating adherent particles. It should be borne in mind that excessive mechanical separation destroys fragile MP particles, and the use of concentrated alkalis and acids to remove organic matter can lead to the dissolution of certain types of polymers.

4) The previous paragraph outlines another important issue that requires consideration and improvement in sample preparation and particle identification processes. As practice

has shown, when determining microplastics in the bottom sediments of offshore areas, particles of several millimeters in size are prone to defragmentation due to their relatively large size, especially during a set of laboratory operations for their isolation. This introduces some uncertainty into the system of counting particles and their dimensions. For example, in one of the samples collected within the mainland slope, a rather large microplastic particle was found in zinc chloride during density separation (station No. 15/Argo-Sirena, PP film measuring 0.7×2.3 mm). In the process of subsequent procedures – washing with distillate, settling in hydrogen peroxide, processing in alcohol, the sample significantly decreased in size, decomposing into a large number of small fragments. At the final stage of quantification, all potential MP fragments (25 units!) that looked similar to film fragments were not included into the count (Fig. 9).

Fig. 8. Fragments of the substance isolated by the flotation process:
1) microplastics (a blue particle), "ingrown" into the mineral-organic aggregate. The particle size is 20-25 microns;
2) a plastic line of an undefined type of black polymer, in an organo-mineral matrix formed, probably, by benthic biocenoses

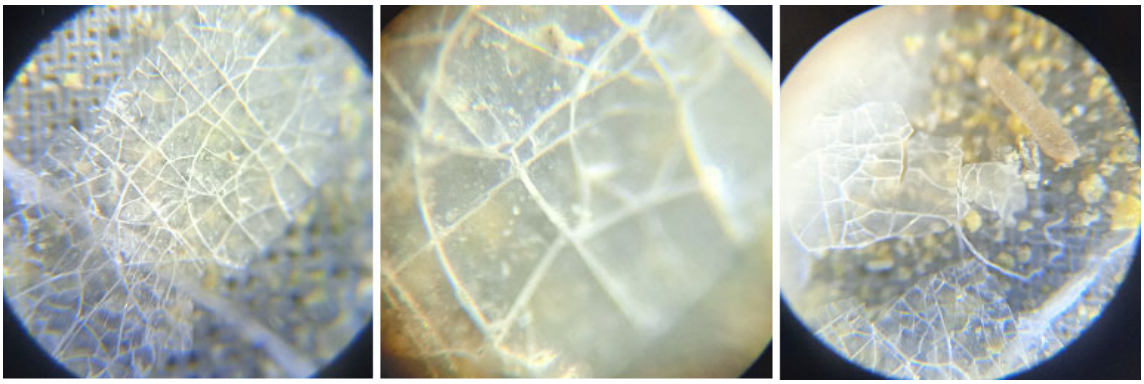


Fig. 9. A microplastic (polypropylene) fragment that resembles a strip in shape (1), its texture in the enlarged photo (2), and sample fragments (3)

In general, in many samples, on the one hand, the absence of MP samples of the upper dimensional limit of 0.3–0.5 cm is noteworthy, and on the other hand, the presence of the same type (single-color) MP fragments in some samples (as can be seen in the station summaries given above). This indicates either the decomposition of relatively large particles of MP in the bottom sediments or their destruction during sample processing. Nevertheless, this is a significant issue that should be given further attention and unambiguous interpretation.

5) The qualitative identification of MP particles in the sediments, as well as determination of the types of selected synthetic polymers, remains a problematic issue. Verification procedures on Raman spectrometer also do not always give unambiguous results. For example, measurements at different points on the surface of a single particle often give different readings due to its component composition, coloring, degree of degradation/rusting, and other factors.

Discussion and conclusions

The results, in general, confirm the data presented in the literature on this topic (D'Hont et al., 2021, Pojar et al., 2021). Studies have shown that microplastic particles in the surface sediments are represented by different types everywhere, with fibers dominating in terms of morphological characteristics. Size of the detected fragments averaged 100-300 microns, with individual specimens reaching 1.5–3 mm. In terms of percentage redistribution among different types of polymers, polyethylene and polypropylene dominated, with polystyrene, polyester, and polyamide accounting for a much smaller share. Single fragments were found of polyvinyl chloride (1 object) and polyurethane (3 objects). Given the density (in g/cm^3) of polyethylene terephthalate (polyester) – 1.24–2.3, polyvinyl chloride – 1.16–1.58, and polyurethane – 1.23 – all these objects were detected due to high density of the zinc chloride solution

As for the distribution of MPs in surface sediments depending on natural conditions (different facies zones, depth distribution, currents, sediment types, and bottom relief), we can document the fact that the amount of polymers, in terms of dry weight of soil matrix samples, increases in the direction of the mainland slope. This raises certain questions about the intensity of dispersed matter

accumulation on sloping bottom areas unstable to accumulation, although the issue of MP concentration in pradeltas has been raised in a number of literature sources (Pellegrini et al., 2023)

It should be noted that since many unidentified particles are overlooked due to their small size, the actual number of MPs in the samples may be 50–70 % higher.

An important result of the work was the identification of a number of topical issues, shortcomings and uncertainties in laboratory research methods, sample preparation and identifying MPs, which should be addressed in the future. The development of non-destructive and at the same time highly effective in terms of the amount of material recovered and identified methods of sample processing and analysis will have a significant impact on the quality of results obtained in the future.

Finally, we would like to note the following: the research currently being conducted by the scientists of MorGeoEcoCenter of the National Academy of Sciences of Ukraine under the DOORS project allows us to gain important practical experience in identifying artificial polymers in geological environment, establish information bases, and define an arsenal of research methods in accordance with the developed European standards. The acquisition of practical experience and further integration into the international system to study the distribution of plastic waste, in particular, microplastics in the Black Sea geo-ecosystems, in the future opens up wide opportunities for Ukrainian geo-ecologists to participate in important international environmental projects, including the implementation of EU's Mission Starfish 2030: Restore our Oceans and Waters.

Authors' contribution: Volodymyr Iemelianov – conceptualization, methodology; Yevhen Nasiedkin – writing (original draft); Tamara Kukovska – methodology, formal analysis; Tetiana Koshliakova – writing (review and editing); Natalia Fedoronchuk – methodology, formal analysis; Ihor Shuraiev – formal analysis, data validation; Volodymyr Yukhymchuk – methodology, data validation.

References

Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin,* 62, 1596–1605. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: a review. *Marine Pollution Bulletin,* 119(1), 12–22. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082

Blair, R. M., Waldron, S., Phoenix, V. R, & Gauchotte-Lindsay, C. (2019). Microscopy and elemental analysis characterisation of microplastics in sediment of a freshwater urban river in Scotland, UK. *Environmental Science and Pollution,* 26, 12491–12504. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04678-1

De Witte, B., Devriese, L, Bekaert, K., Hoffman, S., Vandermeersch, G., Cooreman, K., & Robbens, K. (2014). Quality assessment of the blue mussel (Mytilus edulis): Comparison between commercial and wild types. *Marine Pollution Bulletin*, 85(1), 146–155. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.006

Dekiff, J., Remy, D., Klasmeier, J., & Fries, E. (2014). Occurrence and spatial distribution of microplastics in sediments from Norderney. *Environmental pollution.* 186C, 248–256. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.11.019

D'Hont, A., Gittenberger, A., Leuven, R. S. E. W., & Hendriks, A. (2021). Dropping the microbead: Source and sink related microplastic distribution in the Black Sea and Caspian Sea basins. *Marine Pollution Bulletin,* 173, 112982. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112982

Duis, K., Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe.* 28:2. https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y

Ellrich, J. A., Ehlers, S. M., Furukuma, S., Pogoda, B., & Koop, J. H. E. (2023). Characterization of three plastic forms: Plasticoncrete, plastimetal and plastisessiles. *Science of The Total Environment,* 895, 165073. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165073.

Faure, F., Demars, C., Wieser, O., Kunz, M., & De Alencastro, L. F. (2015). Plastic pollution in Swiss surface waters: Nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environmental Chemistry,* 12, 582–591. https://doi.org/10.1071/EN14218

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). https://doi:10.1126/sciadv.1700782

Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas (2013). MSFD Technical Subgroup on Marine Litter. *Publications Office of the European Union*. https://mcc.jrc.ec.europa.eu/documents/201702074014.pdf

Guidance on the Monitoring of Marine Litter in European Seas (2023). An update to improve the harmonised monitoring of marine litter under the Marine Strategy Framework Directive. *Publications Office of the European Union, Luxembourg*. https://doi.org/10.2760/59137

Guide to microplastic identification (2012). *Marine & Environmental Research Institute*. https://static1.squarespace.com/static/55b29de4e4b088f33db802c6/t/56faf38459827e51fccdfc2d/1459286952520/MERI_Guide+to+Microplastic+Identification.pdf

Hanke, G., Galgani, F., & Werner, S. et al. (2013). Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. *Publications Office of the European Union*. https://doi.org/10.2788/99475

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology,* 46(6), 3060–3075. https://doi.org/10.1021/es2031505

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology,* 46(6), 3060–3075. https://doi.org/10.1021/es2031505

Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: a global review of solid waste management. *Urban Development Series*. 15, 116. http://hdl.handle.net/10986/17388

Imhof, H. K., Schmid, J., & Niessner, R. et al. (2012). A novel highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments. *Limnology and Oceanography: Methods,* 10, 524–537. https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.524

Kershaw, P. J., Turra, A., & Galgani, F. (2019). Guidelines or the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean. *Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Rep. Stud. GESAMP,* 99, 130. https://archimer.ifremer.fr/doc/00585/69677/

Lambert, S., Wagner, M. (2016). Microplastics are contaminants of emerging concern in freshwater environments: an overview. *Freshwater Science,* 36(2), 251–268. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61615-5_1

Lebreton, L. C. M., Van der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's ocean. *Nature communications,* 8, 15611. https://doi.org/10.1038/ncomms15611

Liebezeit, G., & Dubaish, F. (2012). Microplastics in Beaches of the East Frisian Islands Spiekeroog and Kachelotplate. *Bulletin of environmental contamination and toxicology,* 89(1), 213–217. https://doi.org/10.1007/s00128-012-0642-7

Mariano, S., Tacconi, S., Fidaleo, M., Rossi M., & Dini L. (2021). Micro and Nanoplastics Identification: Classic Methods and Innovative Detection Techniques. *Frontiers in Toxicology,* 3, 1–17. https://doi.org/10.3389/ftox.2021.636640

Mariano, S., Tacconi, S., Fidaleo, M., Rossi, M., & Dini, L. (2021). Micro and Nanoplastics Identification: Classic Methods and Innovative Detection Techniques. *Frontiers in Toxicology,* 3, 1–17. https://doi.org/10.3389/ftox.2021.636640

Masura, J. et al. (2015). Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments *(NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48).* http://dx.doi.org/10.25607/OBP-604

McDermid, K. J., & McMullen, T. L., (2004). Quantitative analysis of small-plastic debris on beaches in the Hawaiian Archipelago. *Marine Pollution Bulletin,* 48(7-8), 790–794. https://doi: 10.1016/j.marpolbul.2003.10.017

Nuelle, M. T., Dekiff, J. H., Remy, D., & Fries, E. (2014). A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments. *Environmental Pollution,* 184, 161–169. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.07.027

Pellegrini, C., Saliu, F., Bosman, A., Sammartino, I., Raguso, C., Mercorella, A., Galvez, D. S., Petrizzo, A., Madricardo, F., Lasagni, M., Clemenza, M., Trincardi, F., & Rovere, M. (2023). Hotspots of microplastic accumulation at the land-sea transition and their spatial heterogeneity: The Po River prodelta (Adriatic Sea). *Science of The Total Environment*, 895, 164908. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164908

PlasticsEurope (2018). Plastics – the Facts 2018. https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2018-Plastics-the-facts.pdf.

Pojar, I., Stănică, A., Stock, F., Kochleus, C., Schultz, M., & Bradley, C. (2021). Sedimentary microplastic concentrations from the Romanian Danube River to the Black Sea. *Scientific Reports,* 11, 2000. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81724-4

Schmidt, L.-K., Bochow, M., Imhof, H. K., & Oswald, S. E. (2018). Multi-temporal surveys for microplastic particles enabled by a novel and fast application of SWIR imaging spectroscopy – Study of an urban watercourse traversing the city of Berlin, Germany. *Environmental Pollution,* 239, 579–589. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.097

Vermeiren P., Muñoz C., & Ikejima K. (2020). Microplastic identification and quantification from organic rich sediments: A validated laboratory protocol. *Environmental Pollution,* 262, 114298. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114298

Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: a micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634–6647. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423

Отримано редакцією журналу / Received: 25.07.24
Прорецензовано / Revised: 16.09.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Володимир ЄМЕЛЬЯНОВ[1], д-р геол.-мінерал. наук, чл.-кор. НАН України
ORCID ID: 0000-0002-8972-0754
e-mail: volodyasea1990@gmail.com

Євген НАСЄДКІН[1], канд. геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0003-2633-9291
e-mail: nasedevg@ukr.net

Тамара КУКОВСЬКА[1], канд. геол.-мінерал. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-7532-8885
e-mail: t.kukovska@gmail.com

Тетяна КОШЛЯКОВА[2], канд. геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0001-8551-3531
e-mail: tatianakoshliakova@gmail.com

Наталія ФЕДОРОНЧУК[1], канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-4903-4928
e-mail: fedoronch@gmail.com

Ігор ШУРАЄВ[1], канд. геол. наук
ORCID ID: 0000-0002-6289-8632
e-mail: igorshuraev91@gmail.com

Володимир ЮХИМЧУК[3], д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-5218-9154
e-mail: v.yukhymchuk@gmail.com

[1]Державна наукова установа "Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України", Київ, Україна;
[2]Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна;
[3]Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МІКРОПЛАСТИКУ В ДОННИХ ВІДЛАДАХ ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ЧОРНОГО МОРЯ

Вступ. ***Розповсюдження та накопичення пластикових відходів у навколишньому середовищі нині є визнаною глобальною проблемою. Розробка ефективної стратегії управління пластиковими відходами та мінімізації їх впливу на морське середовище неможлива без проведення польових досліджень у місцях їх накопичення, особливо у донних відкладах. Визначення їх вмісту у верхньому шарі осадів та вивчення якісних і кількісних характеристик дає змогу окреслити закономірності їх надходження в акваторію, поширення та накопичення, ризики впливу на морські організми.***

Методи. ***Візуальне визначення мікрочастинок пластику проводили під монокуляром оптичного мікроскопа SIGETA MB-12 LCD. Альтернативний метод ідентифікації, тест гарячою голкою, також використовувався для визначення пластику під мікроскопом. Раманівську спектроскопію було використано для проведення структурної ідентифікації. Лабораторні дослідження проводили на одноканальному спектрометрі MDR-23 з охолоджуваним CCD-детектором і мікроскопом Micromed.***

Результати. ***Аналіз кожного зразка та подальше узагальнення показали наявність частинок пластику в усіх точках зони відбору, у різних кількостях та складі. Результати досліджень підтверджують, що мікрочастинки пластику в поверхневих відкладах досить поширені на всій території досліджень і повсюдно вони представлені різними типами, де за морфологічними характеристиками домінують волокна, а за хімічними типами – поліетилен і поліпропілен. Стабільної залежності перерозподілу мікропластику різної щільності від відстані від берега немає. Єдине, що можна підтвердити, це нерівномірність латерального розподілу в межах шельфової зони, що цілком імовірно пов'язане з впливом антропогенного площинного навантаження на поверхневі донні відклади.***

Висновки. ***Дослідження показали, що мікрочастинки пластику в поверхневих відкладах досить поширені на всій території обстеження, і всюди вони представлені різними типами, з домінуючими за морфологічними характеристиками волокнами. Що стосується розподілу мікропластику в поверхневих відкладах залежно від природних умов, було з'ясовано, що кількість полімерів, у перерахунку на суху вагу зразків ґрунтової матриці, збільшується в напрямку схилу материка. Важливим результатом роботи стало виявлення ряду актуальних питань, недоліків і невизначеностей у лабораторних методах дослідження, пробопідготовці та ідентифікації мікропластику, які потребують вирішення в майбутньому.***

Ключові слова: ***мікропластик, донні відклади, методика досліджень, екологія, спектроскопія, візуальні обстеження.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

УДК 433
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.14

Ilgar NAMAZOV, PhD (Geol. & Mineral.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0009-0005-7324-0165
e-mail: nurlan.namaz@mail.ru

Vagif KARİMOV, PhD (Geol. & Mineral.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8849-7696
e-mail: vaqifkerimov68@mail.ru

Jafar SHARİFOV, Lecturer
ORCID ID: 0000-0001-9264-2198
e-mail: sherifov.1958@mail.ru

Shafagat PASHAYEVA, Lecturer
ORCID ID: 0000-0002-9143-8790
e-mail: sh73.73@mail.ru

Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan Republic

MODERN HYDROGEOLOGİCAL CONDİTİONS OF THE ABSHERON PENİNSULA

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Background. ***The Absheron Peninsula is the most densely populated and ecologically polluted area in the Republic of Azerbaijan. The rapid development of the oil industry in this area has had a negative impact on both the sea and a significant part of the peninsula. This article examines the physical and geographical conditions, geological and geomorphological structure, and the physico-mechanical properties of rocks from a hydrogeological perspective. By summarizing data on the depth, flow rate, and chemical composition of groundwater and evaluating factors that play a significant role in the formation of the area's hydrogeological conditions, reasons for the rise in groundwater levels have been established, and solutions for their elimination proposed. The aim of the study is to investigate the causes of ecological imbalance, identify factors affecting the modern hydrogeological conditions of the Absheron Peninsula, and suggest preventive measures against potential geological events. The peninsula's hydrographic network consists of the Caspian Sea, streams, numerous saline lakes fed by atmospheric precipitation and oil-containing waters, with lakes having a significant impact on the climate and ecological situation in this densely populated area.***

Methods. ***Research methods involve studying the physico-mechanical properties of soil and rock samples collected from hand-dug wells and boreholes in terms of engineering hydrogeology, their lithological composition, and thickness.***

Results. ***The charachteristics of the artificial lakes, reservoirs, villages, and settlements of the Absheron Peninsula, as well as its unconfined and confined aquifers are studied in the article.***

Conclusions. ***The results have revealed the modern hydrogeological conditions across the entire area of the Absheron Peninsula, as well as natural and anthropogenic factors influencing its formation. Based on these factors, it is possible to predict endogenous and exogenous geological events and take appropriate preventive protective measures. Based on the results of preliminary assessment and earlier hydrogeological zoning, 12 promising areas were identified in 3 hydrogeological areas.***

Keywords: ***Absheron Peninsula, hydrogeological conditions, ecologically polluted area, groundwater, artesian aquifers, physico-chemical composition.***

Background

Located on the eastern edge of the Greater Caucasus and on the western coast of the Caspian Sea within the Republic of Azerbaijan, the large Absheron Peninsula borders Gobustan. Its length is about 60 km, with the widest part reaching 30 km. The surface of the Absheron Peninsula comprises broad plains, ridges, and hills, separated by valleys and depressions. The western part of the peninsula is situated at higher elevations, while the coastal area lies 28.0-28.5 m below sea level (Alekseev, 2020; Geology of Azerbaijan, 2008; Imanov, & Alekbarov, 2017; Karimov, Sharifov, & Mammadli, 2021).

Research on the hydrogeological conditions of the Absheron Peninsula and the factors affecting its formation is of current importance and represents scientific and practical interest. Such studies are crucial for urban planning and construction, selecting territories for water dams, bridges, rail, and roads construction, considering the durability of engineering structures, normal economic activities, predicting endogenous and exogenous geological events (swamps, salinization, landslides, etc.), and developing protective measures against them.

The study also examines temperature indicators, annual precipitation norms, seasonal changes in groundwater levels, as well as their physico-chemical composition, conditions of formation, replenishment, and the potential for use in drinking water and for economic needs.

The hydrogeological conditions and influencing factors, physical-geographical conditions, geological and geomorphological structures, and physico-mechanical properties of rocks, along with endogenous and exogenous phenomena, must be evaluated from a hydrogeological perspective. The Absheron Peninsula mainly hosts the cities of Baku, Sumgayit, Khirdalan, and 32 other settlements, with its orography represented by low mountains in the northwest and southwest, and plains in the central and eastern parts.

The geological structure includes several tectonic structures. The West-Absheron anticlinorium, the Absheron-Jeyrankechmez tectonic zone, the East-Absheron synclinorium, and the Absheron Archipelago anticlinorium, each characterized by its unique geological and geomorphological features. From a geomorphological viewpoint, the peninsula's relief was mainly formed under the influence of dynamic young tectonic movements and abrasion, including exogenous geological factors.

The peninsula's hydrographic network consists of the Caspian Sea, streams, numerous saline lakes fed by atmospheric precipitation and oil-containing waters, with lakes having a significant impact on the climate and ecological situation in this densely populated area. Due to evaporation exceeding annual precipitation three to four times, these lakes tend to dry up and accumulate salt deposits during summer (Amalfitano et al., 2014; Barthel, 2014; Bondarenko et al., 2018; Bravo, 2019; Gadzhiev, & Namazov, 2014).

The rapid industrial development in Absheron has led to population growth and construction of many residential areas without a unified sewage system, worsening the ecological condition of nearby lakes and territories, with lakes such as Boyukshor, Bulbula, Kirmizygol, Khodjasan, and Chukhurdara being the most polluted ones, hindering the expansion of Baku city.

The East-Absheron synclinorium is characterized by deposits from the Quaternary and Agchagyl ages and a productive layer, marked by complex geological structures and consists of various anticlinal uplifts like Sumgayit, Jorat, Novkhani, Fatmai, Garachukhur, Zigh, and the Sandy Island in the Caspian Sea, uniquely stretching in the northeast and southeast directions. The Absheron Archipelago anticlinorium, following a general Caucasian direction, features a series of anticlinal uplifts: Oil Rocks, Yylag, Pirallahi, and the Absheron Bank, extending along the northeastern coast of the peninsula and separated by synclinal depressions. Geomorphologically, the peninsula's relief was primarily shaped by dynamic young tectonic movements and abrasion, including exogenous geological factors. Western Absheron is known for its fragmented relief, predominantly consisting of mountainous areas reaching 370 m in height, connecting with exposures of the Greater Caucasus. Eastern Absheron, east of the Mastaga-Surakhani meridian, presents as a rounded hilly plain. The southwestern part of the peninsula features elevations of 120–130 m. The northwest consists of plains facing the Caspian Sea, represented by coastal terraces, while the area east of the Sumgayit River is a saline depression. The southwest is characterized by saline, dune, and barchan plains of Turkhan and Zira. Hills along the Caspian Sea are shaped by temporary watercourses due to rain and snowmelt. The hydrographic network includes the Caspian Sea, streams like Jeyranchel and Sumgayit, and numerous saline lakes fed by atmospheric precipitation and oil-containing waters, with mineralization levels of 10–100 g/l and a chlorinated, chloro-sulfate-sodium-magnesium chemical composition. Out of the 222,000 hectares of the peninsula's total area, 30,000 hectares have lost their natural potential due to topsoil erosion and are unsuitable for use, though not all are polluted. The oil-polluted part accounts for about 10,600 hectares, with the most polluted areas being in the Garadagh, Binagadi, Sabunchi, Surakhani, Khazar, and Sabail districts (Gadzhiev et al., 2011; Selvaggi et al., 2020; Gruza, & Rankova, 2004; Gyulmamedov, 2021) (Fig. 1).

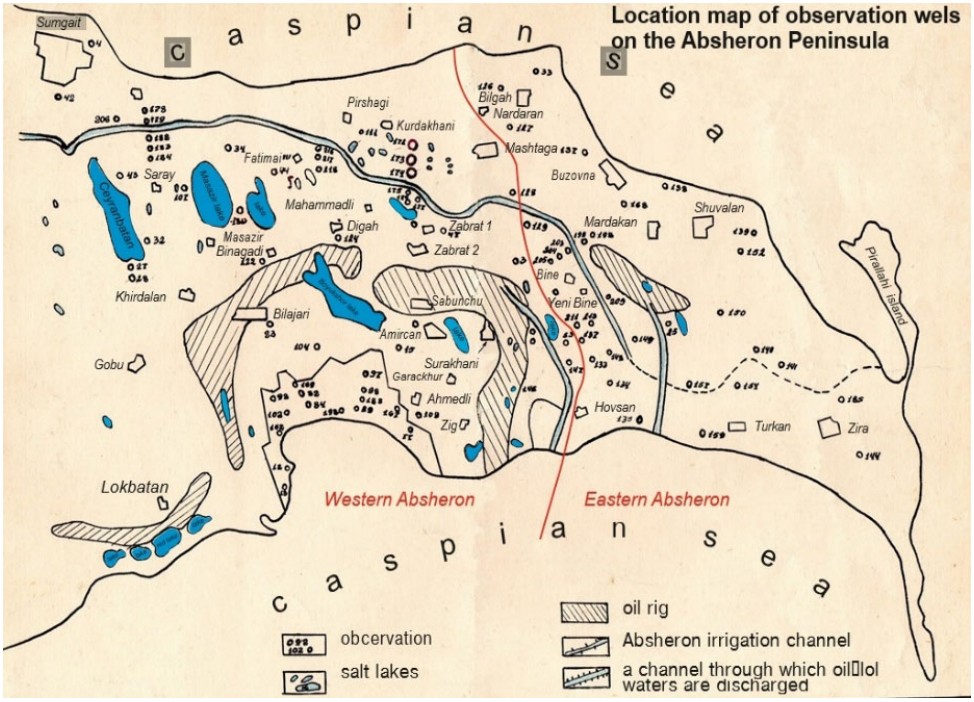


Fig. 1. Lakes of the Absheron Peninsula

Lakes, formed and polluted by industrial and domestic waters, pose significant ecological problems, influencing the climate and environmental situation in this densely populated area (Klige, & Khlystova, 2012; Lee, & Son, 2017; Maksarov, 2023; Montcoudiol, Molson, & Lemieux, 2014; Panteleenko et al., 2023, Smith, & Reynolds, 2003). About 800 lakes cover 3,325 hectares, with 200 being relatively large. Annually, over 40 million cubic meters of wastewater and formation water are discharged into them, exacerbating the lakes' ecological situation due to pollution from oil, industrial and domestic wastewater, and water from many newly built residential and public buildings without proper sewage systems (Wang, Zuo, & Caers, 2017; Wang, Lee, & Son, 2017). With evaporation exceeding annual precipitation by three to four times, these lakes tend to dry up and accumulate salt deposits during summer. Most artificial lakes and ponds were created by long-term discharge of untreated formation water during oil and gas exploration and production. Rapid industrial development led to population growth and the construction of many residential areas. Due to the lack of a unified sewage system, domestic wastewater in residential areas is dumped into nearby lakes and adjacent territories, turning these bodies of water into stressed ecological zones. Lakes like Boyukshor, Bulbula, Kirmizygol, Khodjasan, and Chukhurdara are among the most polluted, limiting the expansion of Baku. Boyukshor Lake, located in the center of the Absheron Peninsula within the Binagadi, Sabunchi, and Narimanov districts, has observed depths of 3.40-3.95 m in open areas, with a

maximum depth of 4.20 m. Near the shores, depths vary from 0.50 to 1.70 m. The lake has an oval shape, extending from northwest to southeast, with a length of 10 km and a maximum width of 1.5–2.0 km, surrounded by an ancient Caspian terrace to the north and a rectangular slope to the south. Currently, Boyukshor Lake is a closed basin, receiving groundwater flows from all surrounding territories.

Methods

During the research period, the authors sampled and determined the degree of mineralisation and chemical composition of the waters of some lakes of the Absheron peninsula (Tab. 1).

The Absheron Peninsula features the artificial Jeyranbatan Reservoir and the Absheron Canal. Settlements and industrial areas on the peninsula are supplied with water from the first and second Shollar aqueducts, the first and second Kura, the Oguz-Gabala-Baku, Jeyranbatan and Takhtakorpu reservoirs, and the waters of the Absheron Canal (Gladilshchikova, & Semenov, 2017; Ismailova et al., 2022; Israfilov et al., 2016; Jungmeister, Gasymov, & Isaev, 2022).

Table 1

Hydrochemical characteristics of the Absheron Peninsula lakes

Name of the lake	Chemical composition of waters according to Kurlov's formula	
	At high water level	At low water level
Haji-Hasan	$M_{2,6}\frac{Cl51,1SO_4 35,8HCO_3 13,1}{(Na+K)78,6Mg12,3Ca9,1}$	$M_{1,9}\frac{Cl44,2SO_4 40,4HCO_3 15,4}{(Na+K)89,7Ca6,9Mg3,4}$
Ganly gol	$M_{1,8}\frac{SO_4 49,5Cl37,3HCO_3 13,2}{(Na+K)74,9Mg18,0Ca7,1}$	$M_{1,3}\frac{SO_4 46,7Cl37,0HCO_3 16,3}{(Na+K)69,9Mg20,8Ca9,3}$
Alatava-I	$M_{2,5}\frac{SO_4 71,5Cl16,5}{(Na+K)72,6Ca17,1Mg10,3}$	$M_{2,2}\frac{SO_4 70,1Cl18,1HCO_3 10,6}{(Na+K)71,9Mg16,3Ca11,7}$
Alatava -II	$M_{3,7}\frac{SO_4 71,9Cl16,5}{(Na+K)67,6Mg17,7Ca14,7}$	$M_{3,4}\frac{SO_4 66,7Cl26,4HCO_3 6,9}{Mg58,7Ca24,9(Na+K)6,4}$
Bulbula	$M_{2,0}\frac{Cl42,1SO_4 30,1HCO_3 27,8}{(Na+K)49,3Mg28,8Ca21,9}$	$M_{1,5}\frac{SO_4 49,4HCO_3 28,4Cl22,2}{(Na+K)73,0Mg15,2Ca11,8}$
Beyuk-Shor	$M_{11,0}\frac{Cl76,9SO_4 11,5HCO_3 5,9}{(Na+K)79,1Mg11,8Ca9,1}$	$M_{2,7}\frac{Cl51,8SO_4 33,0HCO_3 11,6}{(Na+K)87,8Mg6,4Ca5,8}$
Mirzaladi	$M_{220}\frac{Cl88,1SO_4 10,6HCO_3 1,3}{(Na+K)92,1Ca1,9Mg6,0}$	$M_{212}\frac{Cl92,2SO_4 6,4}{(Na+K)91,9Mg6,3Ca1,8}$
Gyrmyzy gol	$M_{324}\frac{Cl94,0SO_4 5,0}{(Na+K)92,6Mg7,1Ca0,3}$	$M_{275}\frac{Cl93,6SO_4 5,9HCO_3 0,5}{(Na+K)93,6Mg6,0Ca0,4}$
Masazyr	$M_{435}\frac{Cl97,2SO_4 2,8}{(Na+K)96,4Mg3,2Ca0,4}$	$M_{310}\frac{Cl92,0SO_4 7,2}{(Na+K)93,0Mg4,0Ca2,0}$
Jeiranbatan Reservoir	$M_{0,9}\frac{SO_4 47,9Cl32,8HCO_3 19,3}{Mg47,7(Na+K)39,1Ca13,2}$	$M_{0,2}\frac{Cl45,1SO_4 42,6HCO_3 12,3}{(Na+K)53,9Ca18,7Mg17,4}$

Its geological structure includes Cretaceous, Paleogene, Neogene, and Quaternary deposits. Geomorphologically, the peninsula's relief has primarily formed under the influence of dynamic young tectonic movements, abrasion, including exogenous geological factors. Hydrogeologically, the Absheron Peninsula is divided into Western and Eastern Absheron districts, with groundwater being widespread in the western part, in Baku, and along the northern coast. In the eastern part, groundwaters have formed in various stratigraphic and genetic deposits (Fig. 2).

During 2010–2023, studies, cadastre and report were carried out by Hydrogeological and Amelioration Service and Water Use and Protection Control Department of "Azerbaijan Land Reclamation and Water Management" JSC. The purpose of these researches, which were carried out under the methodological guidance of the authors of the article, is to determine the peculiarities of groundwater formation within the Absheron peninsula, search and assessment of groundwater reserves suitable for drinking and technical purposes, allocation of promising areas for more precise works. In this connection, complex geophysical and hydrogeological studies were carried out in the Absheron territory during the above-mentioned period. The results of previously conducted geological, hydrogeological and geophysical works, as well as data from wells drilled by individuals and legal entities were studied (Fig. 1).

Taking into account these data and preliminary geophysical surveys on the scale of 1:50000, geological and lithological sections of the area, reservoir characteristics of rocks, etc. were identified and promising areas of underground pressure water distribution were identified. By drilling boreholes in promising areas to depths of 10, 50, 100.0 meters, the conditions of water horizons occurrence were studied by area and depth and corresponding maps were drawn up (Fig. 2).

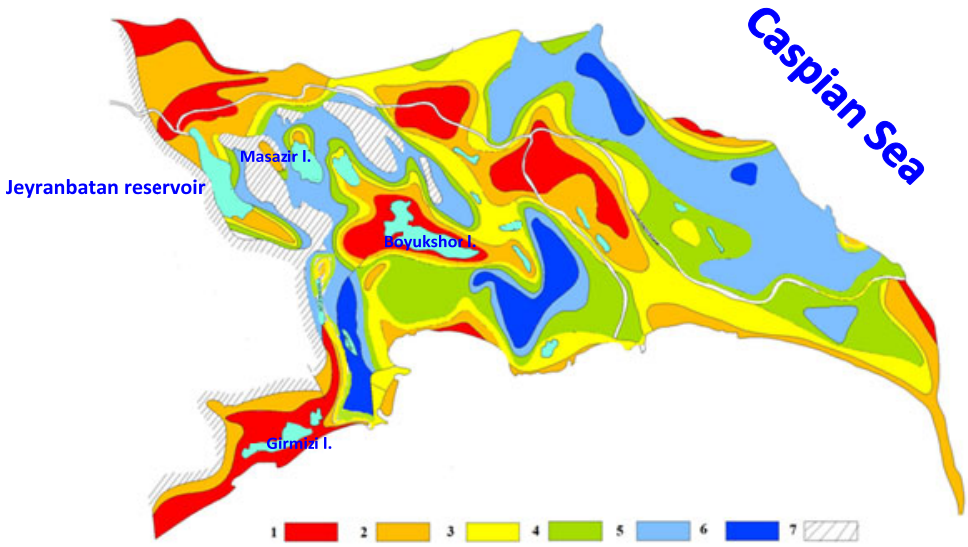
Based on the results of well logging, hydrogeological permeability tests, ground geophysical and laboratory studies, the effective capacity, hydrodynamic and hydrochemical parameters of water horizons were studied. At the same time, by studying the results of previously dug wells, the flow rate and chemical composition of water of the existing water intakes in the territory were studied (Gadzhiev, & Namazov, 2014; Selvaggi et al., 2020; Geology of Azerbaijan, 2008; Gladilshchikova, & Semenov, 2017; Gruza, & Rankova, 2004; Gyulmamedov, 2021; Imanov, & Alekbarov, 2017; Ismailova et al., 2022).

Groundwater is widespread in the Novocaspian deposits of continental origin (alluvial, deluvial, aeolian, etc.), nourished by the waters of the Khvalynsk deposits, mainly flowing horizontally. Wells dug in these deposits yield 0.02–0.2 l/sec, often too saline for water supply use. The Novocaspian aquifer on the Absheron Peninsula appears as a strip along the coast, 60–400 m wide. 70 % of these deposits are sandy shell rocks, 1.0–15.0 m thick, transitioning to clays with depth. Groundwater is uncovered at various depths, sweet to brackish in quality.

The Khvalynsk deposits, mainly found on Western Absheron and water-bearing along the eastern coast,

consist of limestones, sands, and gravels in places, with groundwater levels 2.0 to 16–17 m deep, yielding 0.2–0.7 l/sec. In the Baku fold area, groundwater is mostly brackish to saline. Caspian deposits, prevalent in Sumgayit and Baku, vary in depth, often saline, with mineralization levels of 0.9–2.1 g/l, indicating diverse hydrogeological conditions across the peninsula.

During investigations for the construction of a metro line from "Kara Karaev" station towards Bina airport, groundwater was observed at depths of 35.0–65.0 meters. Near the new Baku Oil Refinery, groundwater is found at depths of 12.0–30.0 meters, primarily in Caspian age deposits consisting of sands, limestones, and clays.



Depth of occurrence: 1. 0–1 m; 2. 1—3 m; 3. 3–5 m; 4. 5–10 m;5. 10–20 m; 6. More than 20 m; 7. Areas of sporadic distribution of groundwater

Fig. 2. Map of the groundwater depth in the Absheron Peninsula

In Bina and the Govsan fold, Caspian deposits' groundwater is accessed by wells at 5.7–23.0 meters, with some yielding 7.01 l/sec. Mineralization increases significantly in the Govsan fold area, mixing with oily waters, reaching up to 100 g/l in outer parts of waste channels. Groundwater associated with the Baku stratum varies in depth around Baku, Sumgayit, Mardakan, and Bina.

Beyond Shuvalan, in an area known as the "Northern TPP" gardens, groundwater is found in sands, limestones, and weakly cemented sandstones at depths mainly between 10.0–18 meters, with a mineralization level of 1.2–2.0 g/l and a sulfate-calcium chemical composition. Groundwater in Baku is found at various depths in sands, limestones, and weakly cemented sandstones, with well yields reaching up to 9.0 l/sec and mineralization levels of 0.7–2.5 g/l, increasing to 67.6 g/l in some areas.

The Upper Absheron water-bearing layer is identified in Bilgah, Gala railway station, Sahil, and Baku fold areas, exhibiting high water yield in some places and serving local sanatoriums. Groundwater in Baku, associated with upper Absheron deposits, is accessed at various depths, generally fresh and low mineralized, with mineralization of fresh spring waters ranging from 0.5–1.2 g/l (Yungmeister et.al., 2022; Tagiev & Karimov, 2021; Tagiev & Babaev, 2016; Tagiev, 2001).

Groundwaters related to the Middle Absheron deposits are identified through wells in various areas, showing different levels of mineralization and water yield. Pressurized freshwater aquifers, widely spread in Eastern Absheron and associated with Quaternary deposits, have been more thoroughly studied in certain areas, with well yields of 0.5–2.0 l/sec and mineralization levels varying. Fresh, slightly mineralised pressure waters are widespread in East Absheron and are confined to Quaternary sediments.

During 2022–2023 years of research the authors sampled and determined the degree of mineralisation and chemical composition of the Absheron Peninsula pressure waters.

Results

The pressure water horizons of Lower Quaternary sediments have been studied in comparatively more detail in the areas of the Baku, Bina-Govsan and Ziryan mulds. The flow rate of wells drilled into these deposits is 0.5–2.0 l/sec, and the degree of mineralisation varies within 12–16 g/l.

In the Bina-Govsan fold, two water-bearing horizons were discovered at depths of 28.5–43.9 m and 47–75 m with yields of 4.0–5.0 l/sec, mostly saline. Due to the pinching out of the Absheron layer deposits, artesian waters emerge as several springs and are accessed by wells with a flow rate of 1.7 l/sec. In the Guzdek fold, artesian waters of the upper Absheron deposits surface through springs and wells, yielding up to 1.7 l/sec (maximum 7.7 l/sec). Artesian waters from the upper and middle Absheron deposits within the Baku fold are accessed at depths of 27–77 m, with mineralization reaching 12–17 g/l. The hydrogeological conditions of the Absheron Peninsula were defined by various factors, including physical-geographic conditions, geological structure, geomorphology, hydrogeological conditions (groundwater depth, flow, composition, mineralization), and the physical and mechanical properties of rocks (Tagiev, 2001; Tagiev et al., 1996; Tagiev, & Babaev, 2017; Tagiev, Kerimov, & Sharifov, 2021; Tagiyev et al., 2022).

These studies identify the modern hydrogeological conditions and both natural and anthropogenic factors influencing the peninsula's formation, aiding in identifying conditions for potential geological events and necessary preventive measures.

Table 2

Hydrogeological parameters for assessment of drinking groundwater reserves (for 2010–2023)

№	№ well	Absolute mark of the well, m	Well depths	Parameters of water horizons									Filtration factor of rocks , m/day	Water permeability coefficient of rocks, m^2/day	Kurlov's formula
				Name and age of rocks	Depth of occurrence, m	Effective thickness, m	Filter interval, m	Static water level, m	Well depth, m	Water level drop, m	Well flow rate, litres/sec	Specific well flow rate, litres/sec m			
1	1^k	18,7	60	Qlap	29–38 46–60	23	28–38 46–56	22,1	35,26	13,16	1,0	0,076	0,55	12,65	$M_{1,1}$ $\frac{SO_4 56xHCO_3 28,4xCl\ 15,5}{(Na+K)53,7xCa27,8xMg18,5}$
2	2^k	22,8	60	Qlap	70–95	17	70–85	12,0	25,0	13,0	0,5	0,077	0,41	6,97	$M_{1,84}$ $\frac{SO_4 47,5xCl37,5HCO_3 15,0}{(Na+K)50,8xMg27,2Ca22}$
3	3^k	7,3	100	Qlap	40–65	25	42–62	4,87	4,46	13,0	1,0	0,77	0,82	20,5	$M_{2,1}$ $\frac{Cl40x3SO_4\ 34,8\ HCO_3 24,9}{(Na+K)60,5xCa19,8xMg19,7}$
4	4^k	-0,3	70	Qlap	4,9–66,0	24	40–65	4,9	9,47	4,57	1,6	0,35	0,51	12,24	$M_{0,74}$ $\frac{SO_4 55,2xHCO_3 40,7xCl4,1}{(Na+K)47,9xCa34,7xMg17,4}$
5	5^k	0,7	70	Qlap	5,7–60	25,0	40–60	5,7	10,3	4,6	1,8	0,39	0,51	12,75	$M_{0,66}$ $\frac{SO_4 43,9xHCO_3 43,1xCl2,2}{(Na+K)\ 45,8xMg33,2xCa221}$
6	6^k	-1,0	70	Qlap	6,28–63	21,0	43–63	6,28	10,02	4,62	1,8	0,37	1,21	25,41	$M_{2,16}$ $\frac{SO_4 44,2xCl37,1xHCO_3 18,7}{(Na+K)62Mg22,2xCa15,8}$
7	7^k	-0,7	70	Qlap	4,1–63,0	22,0	43–63	4,1	13,58	9,48	1,1	0,1	0,39	8,58	$M_{2,18}$ $\frac{SO_4 42,7xCl37,1HCO_3 20,2}{(Na+K)67,6xMg17,5Ca14,9}$
8	8^k	0,8	70	Qlap	4,27–66	20,0	45–65	4,27	13,84	9,57	1,0	0,1	1,43	28,6	$M_{2,34}$ $\frac{SO_4 46xCl33,6xHCO_3 x20,4}{(Na+K)66,2xMg19,3Ca\ 14,5}$
9	9^k	10,7	80	Qlap	2,0–80,0	25,0	53–78	7,9	15,5	7,6	0,6	0,08	0,26	6,5	$M_{2,26}$ $\frac{SO_4 71,7xHCO_3 17,5xCl10,8}{(Na+K)75,6xCa12,8xMg11,6}$
10	11^k	9,2	80	Qlap	2,0–74,0	28,5	35–50 60–64 70–74	12,46	22,38	9,92	0,4	0,05	0,43	12,26	$M_{0,9}$ $\frac{HCO_3 39Cl24SO_4 17,0}{Ca13,1(Na+K)79xMg8,2}$
11	12^k	8,0	80	Qlap	12,46–76,0	40,5	25–55 60–65 70–75	22,46	31,43	8,97	2,24	0,28	1,14	46,17	$M_{0,9}$ $\frac{Cl39,6xHCO_3 34,3xSO_4 28,1}{(Na+K)47Mg29,8Ca28,2}$
12	13^k	11,1	76	Qlap	18,0–30,0 41–50	24,0	41–51	25,46	37,53	12,07	3,01	0,25	0,78	18,72	$M_{1,07}$ $\frac{SO_4 41,1HCO_3 33,1Cl25,8}{(Na+K)63,2Mg23,5xCl13,3}$
13	14^k	20,3	70	Qlap	18–30,0 39–65,0	26,0	40–60	26,7	41,2	14,5	2,8	0,19	0,58	15,08	$M_{3,0}$ $\frac{SO_4 59xCl23xHCO_3 18}{(Na+K)46,7Mg32,9xCa20,4}$
14	15^k	12,5	70	Qlap	19–32,0 41–64	24,0	42–62	17,1	32,9	15,8	2,7	0,59	0,59	14,16	$M_{1,1}$ $\frac{SO_4 46,9xCl27,7xHCO_3 23,4}{Ca38,8xMg38,5x(Na+K)22,7}$
15	16^k	10,8	70	Qlap	40–64,0	31,0	40–60	16,9	32,9	15,3	2,34	0,14	0,21	6,51	$M_{2,07}$ $\frac{SO_4 57,9xCl30,2xHCO_3 12,8}{Ca42,4xMg35,3(Na+K)22,3}$
16	17^k	20,0	100	Qlap	16–22,0 24–38 48–60 66–730 83–92	46,0	50–60 64–74 83–93	8,1	19,7	11,62	1,38	0,12	0,16	7,36	$M_{0,86}$ $\frac{HCO_3 45,7\ SO_4 28,8xCl25,5}{Ca38,8xMg38,5x(Na+K)}$
17	18^k	21,1	100	Qlap	18–41,0 43–50,0 68–74,0 74–78,0	17,0	43–50 68–780	12,75	34,55	21,80	0,8	0,038	1,0	17,0	$M_{6,7}$ $\frac{Cl83,2xSO_4 12,9xHCO_3 3,9}{(Na+K)79,5xCa11,1Mg9,4}$
18	19^k	-1,1	100	Qlap	43–50,0 68–75,0 75–79,0	16,0	43–50,0 66–79,0	5,3	21,3	16,0	1,4	0,09	1,24	19,84	$M_{2,7}$ $\frac{Cl43,5xSO_4 33,4xHCO_3 23,1}{(Na+K)76,2Ca13xMg10,8}$
19	20^k	-21,1	100	Qlap	21,0–42,0 47–53,0 60–69,0 70–75,0 79–92	24,0	45–53 70–75 80–92	0,7	15,8	15,1	1,9	0,13	0,75	18	$M_{2,90}$ $\frac{Cl67,9xSO_4 23,2xHCO_3 8,9}{(Na+K)60,1Ca21,7xMg18,2}$
20	21^k	-21,3	100	Qlap	0,0–23 42–47 58–85	27,0	43–48 61–71 80–90	0,0	12,2	12,2	4,9	0,4	0,52	14,04	$M_{6,6}$ $\frac{Cl70SO_4 23,3HCO_3 6,7}{(Na+K)72,2Mg14Ca13,8}$
21	22^k	-22,0	100	Qlap	5,0–25,0 40–48,0 58–81	31	43–48 61–71 80–90,0	1,8	13,5	11,7	4,5	0,38	0,47	14,57	$M_{1,7}$ $\frac{Cl76,8xHCO_3 16,3xSO_4 6,9}{(Na+K)51,4xMg265xCa22,1}$
22	23^k	-12,5	100	Qlap	21–37,0 50–83,0 90–99,0	34	50–60 75–85 89–99	6,38	12,76	6,38	1,2	0,31	0,7	23,8	$M_{1,57}$ $\frac{SO_4 56,2xCl25xHCO_3 18,8}{(Na+K)54,2xCa28,9xMg22,9}$
23	24^k	-6,3	100	Qlap	12,5–38,0 60–67,0 73–83	29	30–36 60–67 73–83 92–99,0	12,5	37,0	24,5	1,25	0,1	0,39	11,31	$M_{0,56}$ $\frac{HCO_3 61,7xSO_4 35,7xCl_{2,6}}{(Na+K)37,0xCa33,3xMg29,7}$
24	25^k	-7,5	100	Qlap	21,2–38,0 50–60,0 62–67,0 75–65,0 92–98,0	40	50–60 75–85 62–67 93–98,0	21,2	32,98	11,78	1,67	0,14	0,58	23,2	$M_{1,6}$ $\frac{SO_4 45,6xCl30,0xHCO_3 24,4}{(Na+K)72,6xMg20,3xCa7,1}$

Table 3

General hydrogeological characteristics of water horizons and complexes

Name of water complexes	Maximum well flow rate, litres/sec	Special flow rate, litres/sec m	Water mineralisation degree, g/l	Chemical composition of water
Khvalyn water complex	3,01	0,28	1,1–2,07	Sodium chloride, sodium chloride-magnesium-calcium, sodium-sulphate-hydrocarbonate-sulphate-sodium-calcium
Khazar water complex	4,9	0,4	1,07–4,5	sodium-magnesium chloride-sulphate
Absheron water complex	1,0	0,076	1,1–1,84	Sulphate-chlorine-sodium-magnesium-calcium

Discussion and conclusions

The hydrogeological conditions of the Absheron Peninsula and the factors influencing its formation were determined based on the following local indicators:

• physical-geographic conditions, administrative location, climate (long-term, average monthly temperatures, precipitation, evaporation, humidity), hydrographic works, vegetation, and soil cover; geological structure (structural-graphic subdivisions, lithological composition, forms, thicknesses, etc.);

• geomorphological structure (mountainous and plain territories, their altimetric marks, etc.);

• hydrogeological conditions of the area (unconfined and confined waters, depth, discharge, chemical composition, mineralization, etc.);

• the thickness of the pressure and low-pressure water horizon in the East Absheron area is 20–46.0 metres. Low-pressure water is found in Nardaran-Zagulbinsky and Mardakan-Shuvelan sites, and pressure water is widespread in other sites, Gala-Dyubendinsky, Zira-Turkan, Bina and Govsan sites (Tab. 3).

In these areas groundwater is suitable for technical purposes:

• based on the results of preliminary assessment and earlier hydrogeological zoning, 12 promising areas were identified in 3 hydrogeological areas. Below are summarised results of hydrogeological investigations in these prospective areas (Tab. 4);

• it is proposed to continue hydrogeological studies periodically at all sites where exploitable groundwater reserves have been estimated (Yungmeister et al., 2023; Yungmeister, & Gasimov, 2021; Zhukov et al., 2023);

• as a result of investigations in East Absheron carried out by VES method, geoelectro-geophysical sections ρt, 2 Pichugin diagrams, comparative plots of VES curves and logging diagrams of 2 wells drilled by hydrogeologists were constructed. As a result of geophysical research carried out by VES method, geoelectro-geophysical sections of 20 ρt on the territory of Eastern Absheron, 2 graphs of determining the directions of geophysical unconformities along the path of the route by Pichukin method were obtained, a map on a scale of 1:50000 of the results of geophysical research works was made and suitable places for drilling of 31 wells with a depth of 50–100 m were determined;

• physical (granulometric composition, density, porosity, plasticity limits, etc.) and mechanical indicators of rocks (deformation regime, compression degree, resistance to shear and compression, etc.). This comprehensive analysis revealed the current hydrogeological conditions of the Absheron Peninsula, as well as natural and anthropogenic factors affecting its formation.

Table 4

Generalised results of hydrogeological studies of promising areas

Name of the area	Water quality indicator, g/l	Thickness of water section, m	Permissible level drop, m	Filtration coefficient value, m/day	Special flow rate, l/sec m	Exploitable reserves, th. m^3/day	Water utilisation
1. Bilgah water intake	1–1,1	32,6	26,46	1,24	0,15	1,57	For domestic technical purposes
2. Zagulba water intake	1,1–1,5	36,4	21,84	0,81	0,1	0,8	–"–
3. Mashtaga water intake	1,0–2,1	20,62	12,37	1,1	0,07	0,6	–"–
4. Mashtaga water intake	0,66–0.74	57,7	34,62	0,51	0,37	2,7	In all areas
5. Water intake in the north-west of Bina village	2,16–2,34	20,5	12,3	1,32	0,24	1,0	For domestic technical purposes
6. Water intake in the village of Bina	2,18–2,28	23,5	14,1	0,33	0,09	1	–"–
7. Shuvalan-Gala water intake	0,9–1,07	34,5	20,7	0,79	0,17	1,4	In all areas
8. Goshagovak water intake	2,3–3,0	43,2	25,92	0,54	0,14	2,1	For domestic technical purposes
9. Yeni-Gala Pirallahi water intake	1,07–1,10	23,4	14,04	3,8	0,32	3,5	" – "
10. Turkan-Zira water intake	1,37–2,6	29,6	17,76	0,5	0,22	3,6	" – "
11. Govsan water intake	1,7–3,0	35,83	21,5	2,06	0,27	6,6	" – "
12. Govsan -2 water intake	2,0–2,9	30,33	19,9	0,69	0,12	7,5	" – "
For domestic and technical purposes For drinking water						29,39 2,98	
Total						**32,37**	

Studying these factors in the territory allows identifying conditions for potential endogenous and exogenous geological events and implementing necessary preventive protective measures.

Authors' contribution: Ilgar Namazov – conceptualization, formal analysis, methodology, writing (original draft); Vagif Karimov – conceptualization, formal analysis, methodology, writing (original draft); Jafar Sharifov – data validation, writing (review and editing); Shafagat Pashayeva – writing (review and editing).

References

Alekseev, V. I. (2020). Study of changes in the global climate as a complex system using wavelet phase-frequency functions, phase-frequency and phase-time characteristics of heliocosmic and climatic variables. Part 1–2. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, 331, 7, 238–250 [in Russian]. [Алексеев, В. И. (2020). Исследование изменений глобального климата как сложной системы с использованием вейвлетных фазочастотных функций, фазочастотных и фазовременных характеристик гелиокосмических и климатических переменных. Часть 1–2. *Известия Томского политехнического университета. Инженерия георесурсов*, 331, 7, 238–250].

Amalfitano, S., Bon, A. D., Zoppini, A., Ghergo, S., Fazi, S., Parrone, D., Casella, P., Stano, F., & Preziosi E. (2014). Groundwater geochemistry and microbial community structure in the aquifer transition from volcanic to alluvial areas. *Water Resource,* 65, 384–394. https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.004

Barthel, R. A. (2014). Call for more fundamental science in regional hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 22, 3, 507-510. https://doi.org/10.1007/s10040-014-1101-9

Bondarenko, L. V., Maslova, O. V., Belkina, A. V., & Sukhareva, K. V. (2018). Global climate change and its aftermath. *Herald of the Russian Economic University named after B. Plekhanova*, 2, 84–93.

Bravo, S., García-Ordiales, E., García-Navarro, F. J., Amorós, J. Á., Pérezdelos-Reyes, C., Jiménez-Ballesta, R., Esbrí, J. M., García Noguero, E. M., & Higueras P. (2019). Geochemical distribution of major and trace elements in agricultural soils of Castilla La Mancha (central Spain): finding criteria for baselines and delimiting regional anomalies. *Environmental Science and Pollution Research,* 26, 4, 3100–3114.

Gadzhiev, B. A., Babaev, N. I., & Namazov, I. Sh. (2011). Geomorphology and geology of Quaternary deposits. Tarakki.

Gadzhiev, B. A., & Namazov, I. Sh. (2014). Engineering-geological conditions of the Absheron Peninsula and factors influencing its formation. *News of Higher Technical Educational Institutions of Azerbaijan. ADNA*, 4(92), 7–14.

Selvaggi, R., Damianić, B., Goretti, E., Pallottini, M., Petroselli, C., Moroni, B., La Porta, G., & Cappelletti, D. (2020). Evaluation of geochemical baselines and metal enrichment factor values through high ecological quality reference points: a novel methodological approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 1, 930-940.

Geology of Azerbaijan. (2008). Vol. VIII. Hydrogeology. Nafta-Press.

Gladilshchikova, A. A., & Semenov, S. M. (2017). Fundamental and Applied Climatology. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Sixth As-sessment Report Cycle*, p. 13–25 [in Russian]. [Гладильщикова, А. А., & Семенов, С. М. (2017). Фундаментальная и прикладная климатология. *Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК): Шестой цикл оценочных докладов,* с. 13–25].

Gruza, G. V., & Rankova, N. A. (2004). Detection of climate change: state, variability and extremeness of climate. *Meteorology and hydrology*, 4, 50–66 [in Russian]. [Груза, Г. В., & Ранкова, Н. А. (2004). Выявление изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. *Метеорология и гидрология*, 4, 50–66].

Gyulmamedov, Ch. D. (2021). Influence of the Upper Shirvan Canal on the change in hydrogeological and reclamation conditions of the Shirvan steppe of Azerbaijan. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Georesource engineering,* 332, 10, 116–126. https://doi.org/10.1007/s11015-023-01480-w

Imanov, F. A., & Alekbarov, A. B. (2017). Modern changes and integrated water resources management in Azerbaijan. Baku [in Russian]. [Иманов, Ф. А., & Алекперов, А. Б. (2017). Современные изменения и интегрированное управление водными ресурсами в Азербайджане. Баку].

Ismailova, M. M., Maharramov, F. F., Karimov, V. M., & Sharifov, J. J. (2022). Prospects for using thermal water in Kalbajar district and other regions (Azerbaijan) as an alternative energy. *Reliability: Theory and Applications Special,* 3(66) 17, 113–118.

Israfilov, Yu. H, Israfilov, R. H., Guliyev, H. H., & Efendiyev, G. M. (2016). Risk assessment of the water resources losses of the Azerbaijan republic due to climate changes. *News of ANAS, Earth Sciences,* 3-4.

Jungmeister, D. A., Gasymov, E. E., & Isaev, A. I. (2022). Substantiation of the design and parameters of the device for regulating the air flow in down-the-hole hammers of roller-cone drilling rigs. *Mining Informational and Analytical Bulletin,* 6–2. 251–267. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_251

Karimov, V. M., Sharifov, J. J., & Mammadli, M. Z. (2021). Hydrogeological conditions of the Ganykh Ayrichay valley. In the book: the development of science and practice in a globally changing world in terms of risks. *Collection of materials of the IV International scientific-practical conference, Makhachkala*, 71–76. https://doi.org/10.34755/irok.2021.46.94.048

Klige, R. K., & Khlystova, A. I. (2012). Modern global changes in the natural environment. 3. Factors of global changes. Scientific world [in Russian]. [Клиге, Р. К., & Хлыстова, А. И. (2012). Современные глобальные изменения в природе. 3. Факторы глобальных изменений. Научный мир].

Lee, W., & Son, Y. (2017). Low carbon development pathways in Indian agriculture. *Change Adaptation Socio – Ecological Systems,* 3, 18–26.

Maksarov, V. V., Maksimov, D. D., & Sinyukov, M. S. (2023). Quality control of complex contour surfaces in aluminum alloy items during magnetic abrasive finishing. *Tsvetnye Metally*, 4, 96–102.

Montcoudiol, N., Molson, J., & Lemieux, J. M. (2014). Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Quebec, Canada): a regional-scale study. *Hydrogeology Journal,* 23, 2, 377–396.

Panteleenko, F. I., Petrishin, G. V., Maksarov, V. V., & Maksimov, D. D. (2023). Increasing the productivity of magnetic abrasive processing using diffusion-alloyed powders. *Russian Engineering Research*, 43(4), 470–473.

Smith, T. M., & Reynolds, R. W. (2003). Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS database NOAA. *Journal Climate*, 16, 1495–1510.

Yungmeister, D. A., Isaev, A. I., & Gasimov, E. E. (2022). Substantiation of dth air drill hammer parameters for penetration rate adjustment using air flow. *Mining journal,* 7, 72–77. https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.12.

Tagiev, I. I., Karimov, V. M. (2021). Prospects for the development of alternative energy and the use of thermal waters in Azerbaijan. *Ural Geological Journal*, 3(141), 51–58.

Tagiev, I. I., & Babaev, N. I. (2016). Problems of the use and protection of mineral waters of the Azerbaijan SSR. *Bulletin of higher technical educational institutions of Azerbaijan*, 2, 7–13 [in Russian]. [Тагиев, И. И., & Бабаев, Н. И. (2016). Проблемы использования и охраны минеральных вод Азербайджанской ССР. *Известия высших технических учебных заведений Азербайджана*, 2, 7–13].

Tagiev, I. I. (2001). State and problems of environmental protection and nature management in the Republic of Azerbaijan. Ministry of Science and Technology of the USSR. [in Russian]. [Тагиев, И. И. (2001). Состояние и проблемы охраны окружающей среды и природопользования в Азербайджанской Республике. Министерство науки и техники СССР].

Tagiev, I. I., Ismailov, T. A., & Aliev, F. Sh. (1996). Groundwater of the Azerbaijan Republic, its resources, condition and use and problems of protection from pollution and depletion. Ministry of Science and Technical Committee of the Russian Federation. Fed. Bseros. Institute of Scientific and Technical Information (VINITI), Moscow. pp. 28–65.

Tagiev, I. I., & Babaev, N. I. (2017). Some geochemical and hydrogeologial, regularities of formation and distribution of mineral waters of Azerbaijan. *XXXIX International Scientific and Practical Conference Actual problems in modern science and ways to solve them, Moscow*, 15–19.

Tagiev, I. I., Kerimov, V. M., & Sharifov, D. D. (2021). Characteristics of the hydrogeological massifs of the Greater, Lesser Caucasus and Talysh (Azerbaijan) taking into account global climate change. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 3(94), 95–102. http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.12

Tagiyev, I. I., Ismailova, M. M., Karimov, V. M., & Sharifov, J. J. (2022). Groundwater of Ganikh-Ayrichay foothills on the prospects of use. *Reliability: Theory and Applications*, 3(66), 17, 76-81. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-76-81

Wang, J., Zuo, R., & Caers, J. (2017). Discovering geochemical patterns by factor-based cluster analysis. *Journal of Geochemical Exploration.* 181, 106–115.

Wang, S., Lee, W., & Son, Y. (2017). Low carbon development pathways in Indian agriculture. *Change Adaptation Socio-Ecological Systems*, 3, 18–26.

Yungmeister, D. A., & Gasimov, E. E. (2021). Drill rig with a down-the-hole hammer for regulating the drilling rate by changing the air flow. E3S Web of Conferences. EDP Sciences.

Yungmeister, D. A., Timofeev, M. I., Isaev, A. I., & Gasymov, E. E. (2023). Improvement of tunnel boring machine S-782 cutter head. *Mining Informational and Analytical Bulletin*,1, 107-118. https://doi.org/10.25018 / 0236_1493_2023_1_0_107

Zhukov, I. A., Martyushev, N. V., & Zyukin, D. A. (2023). Modification of Hydraulic Hammers Used in Repair of Metallurgical Units. *Metallurgist*, 66, 1644–1652.

Отримано редакцією журналу / Received: 11.05.24
Прорецензовано / Revised: 29.08.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Ільгар НАМАЗОВ, канд. геол.-мінерал. наук, доц.
ORCID ID: 0009-0005-7324-0165
e-mail: nurlan.namaz@mail.ru

Вагіф КАРІМОВ, канд. геол.-мінерал. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-8849-7696
e-mail: vaqifkerimov68@mail.ru

Джафар ШАРІФОВ, викладач
ORCID ID: 0000-0001-9264-2198
e-mail: sherifov.1958@mail.ru

Шафагат ПАШАЄВА, викладач
ORCID ID: 0000-0002-9143-8790
e-mail: sh73.73@mail.ru

Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджанська Республіка

СУЧАСНІ ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ УМОВИ АПШЕРОНСЬКОГО ПІВОСТРОВА

Вступ. ***Апшеронський півострів є найбільш густонаселеним і екологічно забрудненим районом Азербайджанської Республіки. Бурхливий розвиток нафтової промисловості в цьому районі негативно вплинув як на море, так і на значну частину півострова. У цій статті розглядаються фізико-географічні умови, геолого-геоморфологічна будова і фізико-механічні властивості гірських порід з гідрогеологічного погляду. Метою дослідження є вивчення причин екологічного дисбалансу, виявлення факторів, що впливають на сучасні гідрогеологічні умови Апшеронського півострова. Гідрографічна мережа півострова складається з Каспійського моря, струмків, численних солоних озер, що живляться атмосферними опадами та нафтовмісними водами, причому озера мають значний вплив на клімат і екологічну ситуацію в цьому густонаселеному районі.***

Методи. ***Методи дослідження полягають у вивченні фізико-механічних властивостей зразків ґрунтів і гірських порід, відібраних із ручних колодязів і свердловин, з погляду інженерної гідрогеології, їх літологічного складу і потужності.***

Результати. ***Досліджено характеристики штучних озер, водосховищ, колодязів і свердловин Апшеронського півострова, а також його безнапірних і напірних водоносних горизонтів. Узагальнюючи дані про глибину, дебіт і хімічний склад підземних вод і оцінюючи фактори, які відіграють значну роль у формуванні гідрогеологічних умов території, встановлено причини підняття рівня підземних вод і запропоновано шляхи їх усунення.***

Висновки. ***За результатами досліджень уточнено сучасні гідрогеологічні умови на всій території Апшеронського півострова, а також природні та антропогенні фактори, що впливають на їх формування. На основі цих факторів можна прогнозувати ендогенні та екзогенні геологічні події та вживати відповідних превентивних захисних заходів. За результатами попередньої оцінки та раніше проведеного гідрогеологічного районування на 3 гідрогеологічних площах виділено 12 перспективних ділянок.***

Ключові слова: ***Апшеронський півострів, гідрогеологічні умови, екологічно забруднена територія, підземні води, артезіанські водоносні горизонти, фізико-хімічний склад.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні пропублікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results

ГЕОІНФОРМАТИКА

UDC 528.8; 004.932
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.15

Roman OKHRIMCHUK, PhD Student
ORCID ID: 0009-0009-4910-412X
e-mail: romanokhrimchuk@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Vsevolod DEMIDOV, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0009-0003-9472-6530
e-mail: demidov@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Kateryna SLIUSAR, Master's Student
ORCID ID: 0009-0001-2151-6562
e-mail: katyabru31@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

SEA-LAND SEGMENTATION MODELS IN DEEP LEARNING FROM REMOTE SENSING DATA

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

Background. *Coastline changes can have a significant impact on coastal landscape, ecosystems and communities. Therefore, monitoring of such a highly dynamic system as sea-land is an urgent task that can be solved both by traditional methods and by using depth learning techniques to improve the efficiency of processing such as class of tasks. The object of the authors' research is the coastline along the coast of the western part of the Crimean Peninsula, the study of which by traditional methods has become impossible due to the temporary occupation of the Crimean Peninsula since 2014. The paper considers the main coastal indicators and methods of coastline digitization.*

The main types of satellite images as well as their combinations are compared for effective utilization of the shoreline mapping task. Many methods are used to recognize and extract shorelines in satellite images, which are generally divided into three groups: indexing, edge detection and classification methods.

Methods. *Authors compared the main depth learning models that can be used to efficiently recognize the coastline and its boundaries in satellite images, which include ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), Maximum Likelihood Estimation (MLE), Random Forest (RF), K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machine (SVM), U-Net, and Segment Anything Model (SAM).*

Results. *The outlines of the Crimean Peninsula coastline were obtained on the basis of PlanetScope images using ISODATA, MLE, RF, KNN, SVM, U-Net, SAM methods. The obtained images and their performance were compared. The study included the development of a Python code to automatically generate reports including information on five evaluation metrics, such as accuracy (98.96), recall (99.45), precision (97.27), F1-score (98.34), and IoU (96.74), which facilitated the evaluation of different approaches and methods.*

Conclusions. *The comparative analysis highlights the advantage of the U-Net model for shoreline extraction from remotely sensed images. U-Net consistently provides the most accurate and detailed segmentation in different scenarios, demonstrating robustness and accuracy.*

Keywords: *Coastline, Deep Learning Methods, Convolutional Neural Network, U-Net model, Crimean Peninsula.*

Background

Coastal areas are highly dynamic environments, constantly undergoing changes due to various natural processes and human activities (Toimil et al., 2020). These changes can have significant impacts on the coastal landscape, ecosystems, and communities that rely on them (Hawkins, 2012). It is crucial to have effective methods for extracting coastline changes in order to monitor and understand these dynamics (Ballinger, Smith, & Warren, 1994). There are multiple methodologies that can be used to extract coastline changes, ranging from traditional techniques to advanced computational approaches. Traditional techniques for extracting coastline changes include manual digitization from aerial photographs or satellite images, as well as field surveys using GPS or total station instruments. While these traditional methods have been widely used, they can be time-consuming, labor-intensive, and limited in their ability to capture large-scale changes over time. For a more in-depth analysis, it may also be necessary to monitor factors that may influence shoreline change. The control of ground cover and its degradation may also be an important factor influencing shoreline development, which can also be monitored by geophysical surveys (Menshov, 2016). However, in this study the authors used only satellite data for analysis. In our effort to observe variations in the shoreline, we conducted a thorough investigation into several methods for extraction. Our extensive research encompassed a wide variety of techniques, including thresholding methods as well as advanced machine learning algorithms and deep learning approaches. Additionally, we presented a comprehensive analysis of remote sensing datasets to highlight their potential for addressing the specific objective. Moreover, the novel deep learning solutions have progressed to support scalability and broad applicability, enabling coastline detection models to be used in diverse geographical areas and with various satellite sensors with minimal human intervention. This scalability is especially beneficial for extensive coastal monitoring projects and global mapping endeavors.

Shoreline Indicators & types

Coastal indicators are visual characteristics used to represent the position of the coast. These indicators are determined by geomorphological features like coastal dunes, cliffs, or the arrangement of vegetation along the backshore. Comparing of these indicators with actual shorelines is complex due to variations in beach profiles which prevent one single indicator from fitting all coast types uniformly (Toure et al., 2019). Fig. 1 shows the main shoreline indicators. Identifying all the indicators shown in Fig. 1 based on multispectral satellite images is challenging due to their characteristics that may not always be discernible in a two-dimensional image. Nevertheless, it is still possible to use (A, B, C, D, E, J, K, M, and P), which are

morphological reference boundaries between water and land and can be recognized even at a less detailed resolution than 10 meters (McAllister et al., 2022). In order to accurately determine the position of the coast, it is necessary to consider different shoreline indicators (Boak, & Turner, 2005). Also, the type of coastline should be taken into account when deciding which method to use for shoreline delineation. A basic method for converting the coastline into digital format involves manually tracing vectors in QGIS or ArcGIS software, using visible features as the previous high-water line or the wet/dry boundary. Advanced approaches use classification and clustering approaches to automate the process of deriving these lines. Also, shorelines could be extracted using tidal datums. In comparison to the actual shoreline position, these methods rely on standard elevation determined by a tide level derived from where the coastal profile intersects with a specific vertical elevation. Proxies for these shorelines include mean high waterline which is based on extracted waterline contours and data related to tidal datums. This approach was successfully used in combination with Landsat optical imageries to map the coastline of Australia (Bishop-Taylor et al., 2021) using Open Data Cube.

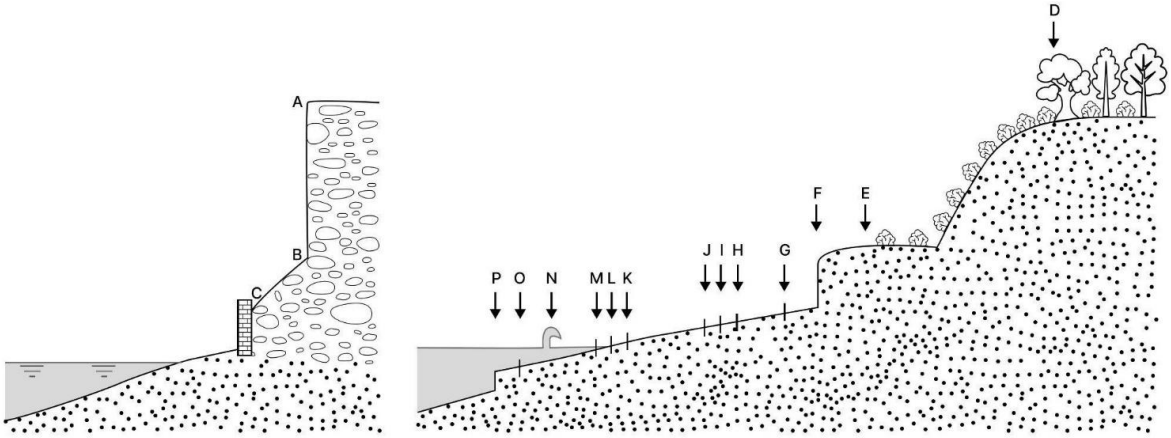


Fig. 1. Shoreline indicators (Boak & Turner, 2005)
A – Bluff top/cliff top, B – Base of the bluff/cliff, C – Landward edge of a revetment structure, D – Seaward stable dune vegetation line, E – Seaward dune vegetation line, F – Erosion scarp, G – Storm/debris line, H – An old high tide water level, I – Previous high tide high water level, J – Mean high water, K – Wet/dry line or runup maxima, L – Groundwater exit point, M – Instantaneous water line, N – Shorebreak maximum intensity, O – Mean lower low water line, P – Beach toe/Crest of beach step

Fig. 2 displays various types of coastline schematic diagrams as outlined by Zheng et al. The artificial coast comprises man-made coastal structures like border dikes, wharves, breakwaters, revetments, and slopes. This type of coastline aligns with these permanent structures and the boundary line near the land is utilized in sea-closure engineering. Rocky coastlines are characterized by rocky outcrops with prominent headlands and bays that extend further into the land, resulting in a twisting coastline defined by the land-water interface of headlands and steep cliffs.

Developed silty muddy coasts feature shrimp ponds, salt fields, and economic areas built on tidal flats along with dams to prevent high seawater inflow. The breakwater indicates the location of the coastline in this instance. Undeveloped silty muddy coasts are shaped by tidal action featuring a gentle beach-face slope several kilometers wide where tidal creeks are generally found connecting to river estuaries; this type uses changes in growth status of salt-tolerant plants as its defining boundary for identifying it as a coastline. Biological coastlines encompass mangrove, coral reef, and reed areas, where the line between the sea and land can be distinguished by features such as inner mangrove boundaries or marked differences between reed abundance and thinning. Sandy coasts form by the accumulation of sand due to wave action. The boundary between the grit and the non-sand features on the land is regarded as the coastline.

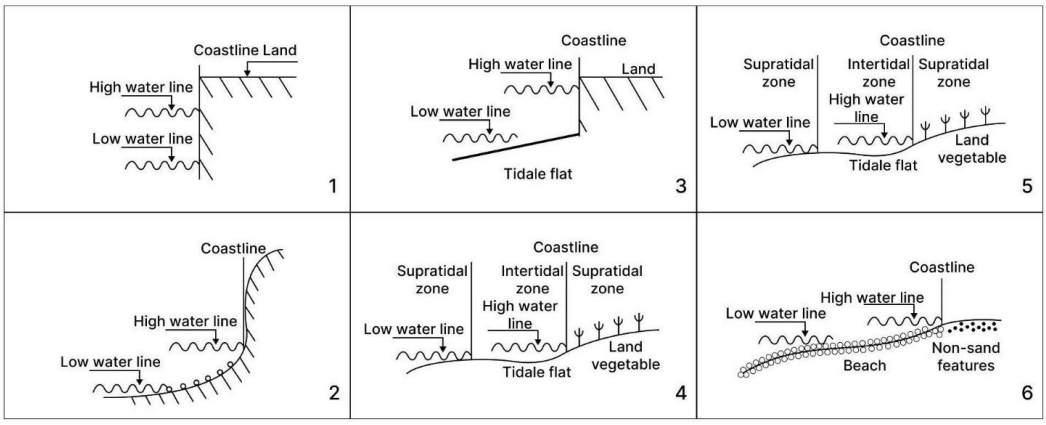


Fig. 2. Coastline Type Schematic Diagrams (Zheng et al., 2023)
1 – Artificial, 2 – Rocky, 3 – Developed Silty Muddy, 4 – Undeveloped Silty Muddy, 5 – Biological, 6 – Sandy

Each schematic diagram highlights the unique characteristics and features of these coastline types, such as the high-water line, low water line, intertidal zones, subtidal zones, supratidal zones, tidal flats, and associated vegetation. Understanding these characteristics is crucial for selecting the appropriate method for shoreline delineation, as different techniques may be better suited for different types of coastlines.

Remote Sensing data

When conducting sea-land segmentation, the choice of the appropriate dataset plays a critical role in ensuring accuracy and reliability in shoreline mapping. Remote sensing data, with its diverse range of imaging techniques, are based on the recording and subsequent interpretation of reflected solar radiation (electromagnetic waves) from the surfaces of soil, vegetation, water, and other objects, as well as the thermal radiation emitted by the Earth (Zatserkovnyi, et al., 2016). They can be divided into active and passive, differentiated by their energy sources for data acquisition. Active remote sensing utilizes synthetic electromagnetic signals, notably radar, to interpret object characteristics through reflected energy. Conversely, passive remote sensing utilizes ambient solar radiation, quantifying energy naturally reflected or emitted from terrestrial surfaces for data collection. Radar and optical images, as well as their fusion, can be effectively utilized for coastline mapping.

Optical satellite imagery is typically used for delineating coastlines due to the capability of optical sensors to collect data across a wide range of wavelengths in the electromagnetic spectrum. By combining spectral channels, it is possible to calculate spectral indices, such as the normalized difference water index (NDWI), which allow for better distinction between water and land classes. For detailed shoreline mapping, channels within the Visible (VIS) and Near Infrared (NIR) parts of the electromagnetic spectrum are most suitable as they usually have higher spatial resolution compared to Short-Wave Infrared (SWIR) and Thermal Infrared (TIR) channels. The spatial and temporal resolutions, data availability ranges, and providers of commercial and publicly available optical satellite images are shown in Fig. 4. In comparing commercial and public available images, commercial ones are expensive to use in large-scale and long-term research. Another major drawback of commercial images is the lack of a worldwide historical archive, as they are typically acquired for specific areas and purposes. On the other hand, an important advantage is that they are traditionally used for detailed mapping as most of them have a very high resolution (VHR) according to the categories defining spatial resolution in Earth observation data (ESA, 2022).

As well as optical images, radar ones are also commonly used for coastal mapping. Radar data is particularly useful for this purpose because of its ability to penetrate cloud cover and operate without dependence on sunlight, providing reliable data in all weather conditions and time of a day. As a result, radar data is less affected by atmospheric conditions than optical data, which ensures consistent and continuous monitoring.

Methods

This section provides a thorough overview of various methods used for extracting coastlines from satellite imagery. It clarifies the underlying theories and procedural steps related to different methodologies, including methods applied in the past for coastline extraction. In the present day, a variety of techniques are employed for recognizing and extracting coastlines from remote sensing (RS) imagery, broadly categorized into three groups: indexing methods, edge detection, and classification. Indexing methods concentrate on remote sensing indices and thresholding. In the case of edge detection approaches, the extraction of coastlines is treated as a problem of detecting edges for water bodies or oceans in the proposed method. Regarding image classification, these methods mainly revolve around object-oriented and pixel-oriented classification (Ge, Sun, & Liu, 2014). RS image classification predominantly relies on the spectral attributes of features, which constitute multi-band measurements of the electromagnetic radiation of these features. These measurements serve as the original feature variables for remote sensing image classification. Furthermore, texture, shape, and other topographical features are incorporated alongside spectral characteristics in the analysis.

Utilizing Indices with Thresholding Methods

At the early stages, water bodies are segmented mainly based on spectral thresholding (Nones, 2020). In the context of remote sensing, thresholding is often applied to remote sensing indices to classify different land cover or land use types within an image. Sea-land segmentation thresholding refers to the process of dividing an image into distinct regions corresponding to sea and land areas based on a predefined threshold. Sea-land segmentation thresholding method involves selecting a threshold value that separates the pixel intensities associated with sea and land. In practice, the values of the remote sensing indices (e.g NDVI, NDWI) or single-band reflectance are treated as objects to be clustered (Zhou et al., 2023).

The thresholding in SLS (Sea-Land Segmentation) process can be implemented using various techniques, including simple intensity thresholding, adaptive thresholding, or more sophisticated methods such as Otsu's method, which automatically calculates an optimal threshold based on the image histogram. Global Thresholding involves applying a single threshold value to the entire image due to separate different land cover classes. The OTSU algorithm, are automated thresholding technique that selects the threshold value by maximizing the between-class variance in pixel intensities. It (style) adapts the threshold determinations for optimal segmentation based on least squares principles (Otsu, 1979).

Unlike global thresholding, adaptive thresholding calculates threshold values for smaller, localized regions within the image. Using a single global threshold for the entire image to distinguish water/land boundaries can overlook local coastline edges due to varying image intensity, leading to fragmented coastline edges in low-contrast areas (Karslı, 2011). In contrast, the local thresholding method dynamically adjusts the threshold based on neighboring pixel characteristics (Vukadinov, Jovanovic, & Tuba, 2017). This capability enables the local thresholding method to outperform global thresholding.

However, sea-land segmentation thresholding has its limitations. It may not accurately distinguish between sea and land areas in complex scenes with varying lighting conditions, shadows, or overlapping textures. Additionally, choosing an appropriate threshold value can be challenging and may require manual adjustment with additional information, such as contextual features or ancillary data, to improve segmentation accuracy.

Edge Detection Methods

Edge detection stands out as a highly efficient automated technique for coastline extraction, particularly in contrast to the manual visual interpretation approach (Chen et al., 2019). Landsat data, renowned for its moderate spatial resolution, emerges as the predominant remote sensing dataset utilized for this purpose (Roelfsema et al., 2013). The most classical image-segmentation methods are

edge-differential operators (such as Sobel operator, Canny operator and Roberts operator). The Canny edge detection method was used widely compared with the Sobel detector, Laplacian detector, Robert detector, and Prewitt detector because it can provide more precise results (Chen et al., 2019). The Sobel Edge Detector exhibits sensitivity to both image noise and edge orientations. Laplacian Edge Detector remains a valuable tool in highlighting regions of rapid intensity change, such as the land-water boundary. But it may produce inconsistent edge widths, particularly noticeable in regions where the coastline width varies, thereby affecting the reliability of the detected coastline features (Wei et al., 2021).

As a matter of fact, an approach that combines Canny edge detection methods with Landsat data can efficiently extract shoreline information from remotely sensed images. The average error between the Google Earth image and the extracted coastline falls below the theoretical maximum allowable error, indicating the method's accuracy (Hu, & Wang, 2022). Yet, in scenarios where the background of the coastline image is intricate, traditional methods tend to be susceptible to noise, leading to fragmented extraction outcomes unsuitable for extensive coastline analysis. Manual intervention is often necessary in edge detection, with mathematical morphology employed to refine the results. Enhancing accuracy entails integrating additional methods for a more comprehensive approach (Zhou et al., 2023).

Active Contour Methods

The Active Contour Model, also known as snakes, is an advanced technique for image segmentation. In recent years, the Active Contour Model has been extensively utilized for coastline extraction, owing to its methodology of evolving a contour or curve to precisely align with the boundaries of objects within an image (Klinger et al., 2011). This process uses energy minimization, where internal forces maintain the contour's smoothness, and external forces, derived from the image data, guide the contour towards the edges or other specific features (McAllister et al., 2022)

A researcher has proposed two enhanced level set-based algorithms for extracting coastlines from SAR images (Ouyang, Chong, & Wu, 2010). However, the adjustment of relevant parameters poses a significant challenge and can directly impact the extraction results. The Active Contour Model is highly effective in fields requiring precise boundary detection, but it has several limitations. It can struggle with images containing noise, weak edges, or complex textures, which can lead to inaccurate segmentation. To address these challenges more sophisticated energy functions can be utilized or the Active Contour Model can be combined with other segmentation techniques like machine learning algorithms.

Machine Learning

The multidimensional nature of remote sensing imagery, encompassing various spectral bands, temporal resolutions, and spatial dimensions, has sparked considerable interest in leveraging machine learning tools for automated coastline identification. One advantage of ML-based approaches is their ability to capture subtle and nuanced relationships within the data that may be challenging to express using traditional thresholding or rule-based methods. Generally, machine learning methods can be broadly classified into two primary categories: unsupervised and supervised learning (Shirmard et al., 2022). Different classification algorithms may excel in solving specific problems or datasets but might not perform optimally for others. Therefore, before tackling a problem, it's crucial to explore and compare various classification algorithms tailored to the dataset at hand.

The support vector machine (SVM) is a supervised machine learning method commonly employed for classification and regression tasks (Kalkan et al., 2013). ML algorithms like random forests and support vector machines (SVMs) are highly effective in deciphering intricate patterns and characteristics within remote sensing data. By training these algorithms on datasets labeled with examples of coastal features, they can discern between sea and land areas and accurately delineate coastline boundaries. However, SVMs encountered challenges when applied to large datasets and struggled to yield satisfactory outcomes for perceptual tasks like image classification. Moreover, as SVMs are shallow methods, they require manual extraction of useful representations, termed feature engineering, which can be complex and fragile (Chollet, 2017).

Random forests exhibit versatility across a broad spectrum of problems and are often considered a reliable choice, frequently ranking as the second-best algorithm for shallow machine-learning tasks. Gradient boosting, a technique used to enhance machine-learning models by iteratively training subsequent models to address weaknesses in previous iterations, is employed. It stands as one of the most effective algorithms, particularly for handling non-perceptual data in contemporary contexts (Chollet, 2017). Applying coastal research, the Random Forest technique has been applied to near-infrared bands extracted from LANDSAT-8 and GOKTURK-2 satellite imagery. Manual digitization of each image was conducted, followed by shoreline extraction to evaluate accuracy (Bayram et al., 2017) The results of this accuracy assessment confirm the efficiency of the Random Forest method for shoreline extraction studies across both medium and high-resolution satellite images.

Still, with sufficiently large training sample sizes, Random Forest's (RF) performance showed little disparity between balanced and imbalanced training sets. Notably, it's important to highlight that this observation was made across various satellite imagery datasets (Colditz, 2015; Mellor et al., 2015). This underscores the need to consider the performance of the RF classifier across different satellite imagery datasets when employing various training sample strategies, such as balanced versus imbalanced (Thanh Noi, & Kappas, 2018). Furthermore, it's imperative to acknowledge that RF classifiers may encounter challenges when applied to satellite image segmentation tasks, particularly in scenarios with heterogeneous or complex landscapes where accurate delineation of features may be difficult to achieve.

Unsupervised learning involves identifying patterns without relying on a target property. In this approach, all available factors are treated as input sources. Two of the most commonly used algorithms in remote sensing are the K-means and ISODATA clustering algorithms. The K-means algorithm is implemented through the k-means function, which allows for specifying either the cluster centers' locations or the number of clusters via the center parameter. This function facilitates multiple random partitioning attempts, ultimately returning the partition that minimizes the sum of squared distances (Gentleman, & Carey, 2008). The ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis) algorithm is similar to K-means but differs in that it allows for a variable number of clusters, whereas K-means requires the number of clusters to be known beforehand. K-means adjusts clusters on a sample-by-sample basis, while ISODATA statistically examines clusters after each iteration. The ISODATA technique for multispectral WorldView-2 satellite imagery classification demonstrated high reliability and compatibility by closely matching expert-identified reference shorelines and effectively considering the influence of various coastal features on shoreline extraction

accuracy (Sekovski et al., 2014). However, a general disadvantage of both the K-means and ISODATA algorithms is that they work best for images with clusters that are spherical and have the same variance. This condition is often not met in remote sensing images, which can limit the effectiveness of these algorithms. Practical implementation of these both methods will be discussed further.

Deep Learning

The application of deep learning techniques to process remote sensing data for coastline extraction is a burgeoning area of research. While previous studies have not only compared deep learning methods with traditional approaches but also evaluated the performance of various deep learning models, there is a compelling need for more extensive exploration in this domain. Studies reveal that machine learning-based algorithms for coastline detection are progressively outperforming traditional statistical methods (Liu et al., 2019). Deep convolutional neural networks (convnets) possess the capability to automatically adapt to the distinct characteristics of various coastal environments, accommodating variations in shoreline types, coastal morphology, and land cover. Another significant factor is its ability to simplify problem-solving by automating the crucial step of feature engineering. Traditional machine-learning techniques, known as shallow learning, typically involve transforming input data into one or two representation spaces through simple methods like high-dimensional non-linear projections (e.g., support vector machines) or decision trees (Chollet, 2017). These techniques often failed to produce the refined representations necessary for complex problems, requiring extensive manual effort to engineer suitable data representations—a process known as feature engineering. In contrast, deep learning automates this entire step, enabling the learning of all features in a single pass. This automation has significantly streamlined machine-learning workflows, often replacing complex, multistage pipelines with a single, end-to-end deep-learning model.

When developing a reliable, universal, and effective tool for detecting changes in the coastline, it is essential to analyze available algorithms that can perform shoreline contour recognition. (Okhrimchuk et al., 2024) Convolutional Neural Network (CNN) is a type of feedforward neural network composed of artificial neurons. It includes a convolutional layer, a pooling layer, and a fully connected layer. CNNs are applied to remote sensing images for feature detection, edge extraction, and pixel-based classification. Convolutional Neural Networks (CNNs) are highly effective for complex coastline extraction tasks, especially when trained on large datasets of remote sensing images (Okhrimchuk, Demidov, & Brudko, 2022). Nevertheless, certain challenges must be addressed, such as the blending of boundary pixels between water and land, and the necessity for a substantial number of trainable parameters and training samples (Tambe, Talbar, & Chavan, 2021). To overcome drawbacks, researchers proposed more robustness and generality modified models based on CNN architecture (Miao et al., 2018).

The Segment Anything Model (SAM) offers clear segmentation results and exhibits flexibility across various types of coastlines. SAM utilizes multi-scale processing to capture details at multiple levels, ensuring precise identification of coastal boundaries. Attention mechanisms within SAM enhance segmentation accuracy by focusing on crucial features such as shoreline contours and coastal structures (Kirillov et al., 2023). SAM offers a flexible and powerful approach to image segmentation, but its general-purpose nature may not match the task-specific performance of models like U-Net for coastline extraction. Particularly, SAM struggles with extremely fine details and complex regions within coastal landscapes.

Segmentation of satellite images is a distinct application of convolutional neural networks. The semantic segmentation approach using U-Net is particularly effective for this task, as it can extract the most informative features and generate interpretable results. Therefore, employing an adaptive mechanism like U-Net for semantic segmentation is recommended for extracting and interpreting key features from input data (Okhrimchuk, Tishaiev, & Zatserkovnyi, 2020). Beyond just developing a robust model, the quality of remote sensing CNN models hinges significantly on the quality and size of the ground truth dataset. Equally crucial is the thorough preprocessing of remote sensing data. The effectiveness of a deep learning model is heavily influenced by the size and diversity of its training samples, underscoring the importance of data augmentation in preparing a comprehensive training dataset (Brudko, Okhrimchuk, & Demidov, 2022).

Results

The evolution of remote sensing sensors, coupled with enhanced computational capabilities and the integration of machine learning techniques, has revolutionized real-time waterline identification, automated coastline extraction, and continuous monitoring (Zhou et al., 2023). While traditional statistical methods historically dominated coastline extraction from remote sensing images, the introduction of machine learning and deep learning models has markedly improved both accuracy and efficiency.

A comparison of various data sources, including radar imagery, has been conducted to assess their effectiveness in sea-land segmentation. Radar data, specifically from C-band SAR sensors, is best suited for global mapping and change detection (Flores et al., 2019). However, the complexity in processing and interpreting radar images emerged as a key factor influencing the overall results. The comparison highlights both the strengths and limitations of radar data. Fig. 3 shows a timeline of available C-band synthetic aperture radar missions between 1990 and 2024, where the resolution corresponds to the maximum spatial resolution that the sensor can achieve.

Optical satellite imageries were utilized in the research due to its effectiveness in achieving high-precision coastline delineation. Additionally, according to Fig. 4, it can be noted that public images are a better option for historical monitoring of coastal changes. In this regard, Landsat has existed since 1982 and offers the opportunity to conduct historical analysis. However, if the investigation focuses on the last decade, Sentinel-2 is more appropriate due to its higher spatial resolution and revisit time. Optical satellite images are invaluable data for delineating coastlines, especially when using spectral indices to make the land-water boundary better defined.

The choice between commercial and public available images depends on the specific needs of the project. While commercial data have a very high resolution suitable for detailed mapping, their essential disadvantages are high cost and limited historical archives. Publicly available images are a more cost-effective solution with a large amount of historical data, making them ideal for global spatial-temporal coastal monitoring. PlanetScope imagery was selected for this research due to its high spatial resolution and frequent revisit times enabling precise shoreline segmentation (Shin et al., 2020). Additionally, PlanetScope offers the advantage of near-daily global coverage, which allows for consistent monitoring of rapidly changing coastal environments.

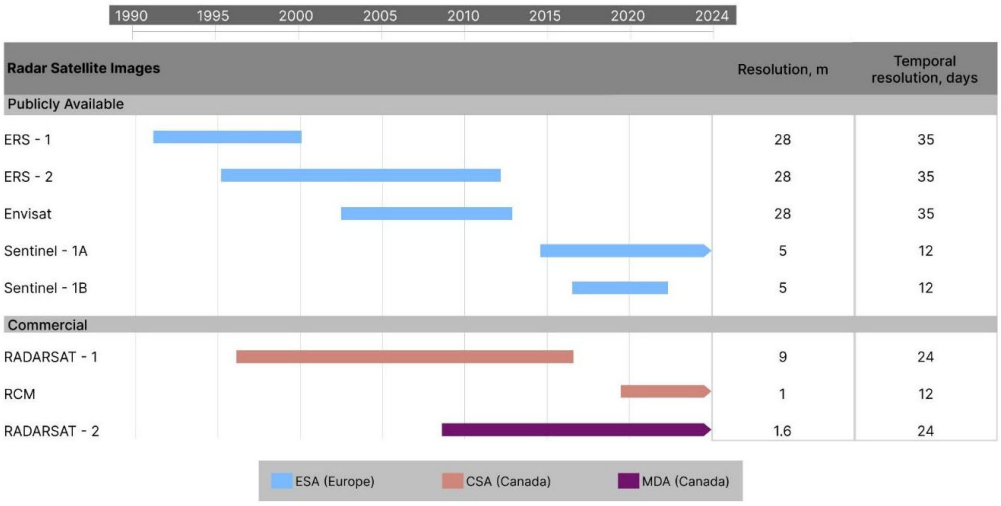


Fig. 3. Timeline of C-band synthetic aperture radar missions between 1990 and 2024 and their main characteristics (ESA, 2021; Flores et al., 2019)

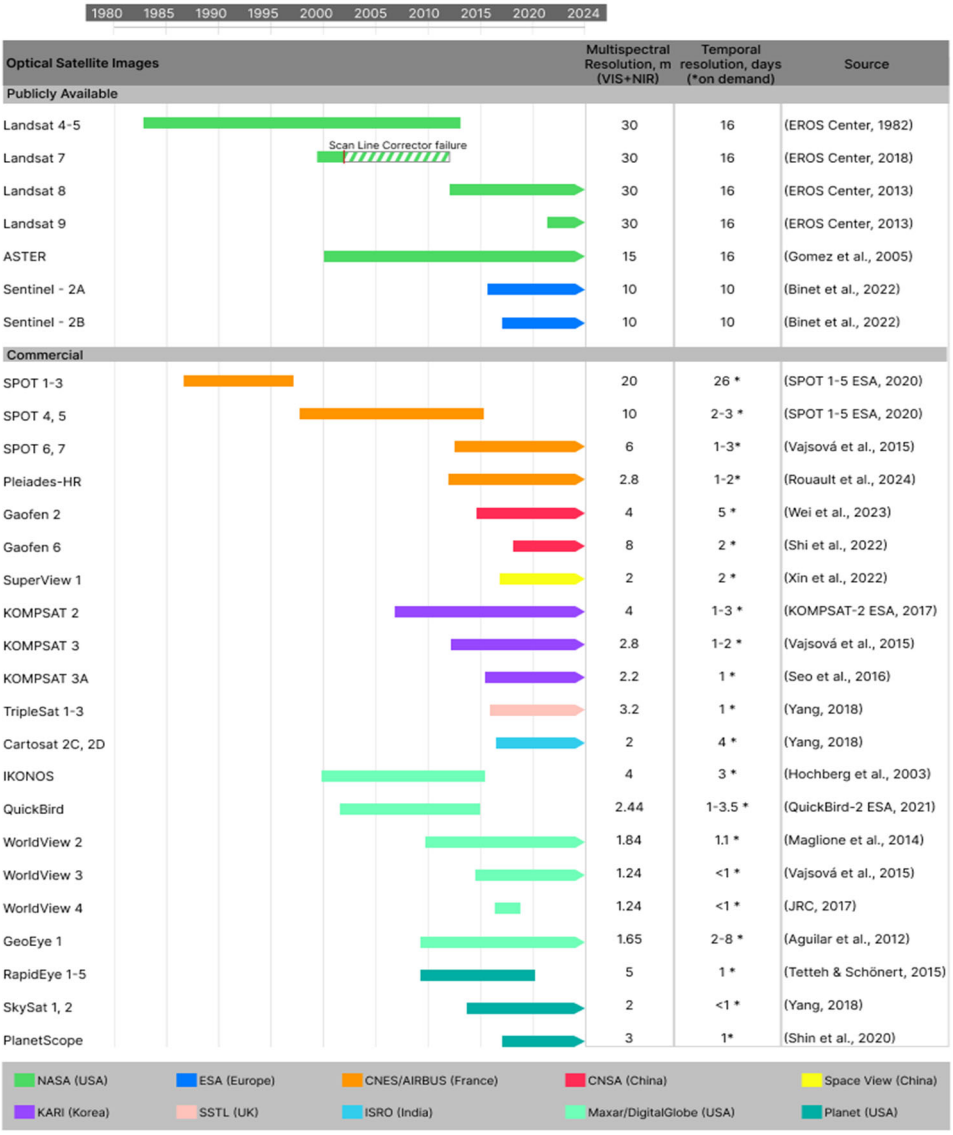


Fig. 4. Timeline of multispectral imaging satellite missions between 1980 and 2024 and their main characteristics (Aguilar et al., 2013; Binet et al., 2022; EROS Center, 1982; EROS Center, 2013; EROS Center, 2018; Gomez et al., 2005; Hochberg et al., 2003; JRC, 2017; KOMPSAT-2 ESA, 2017; Maglione et al., 2014; Rouault et al., 2024; QuickBird-2 ESA, 2021; Seo et al., 2016; Shi et al., 2022; Shin et al., 2020; SPOT 1-5 ESA, 2020; Tetteh, & Schönert, 2015; Vajsová et al., 2015; Wei et al., 2023; Xin et al., 2022, Yang, 2018)

To evaluate the efficiency of various machine learning and deep learning models for sea-land segmentation, a dataset derived from PlanetScope imagery with a spatial resolution of 3 meters was utilized. Specifically, the performance of the following models was evaluated: ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), Maximum Likelihood Estimation (MLE), Random Forest (RF), K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machine (SVM), U-Net, and the Segment Anything Model (SAM). The comparative analysis is based on the segmentation results from these models applied to high-resolution optical satellite images, as illustrated in the Fig. 5.

To systematically compare the performance of these models, we applied each technique to a set of multispectral remote sensing images and evaluated the resulting segmentations against ground truth data. The evaluation criteria included accuracy, boundary delineation precision, noise levels, and the ability to handle complex coastal features.

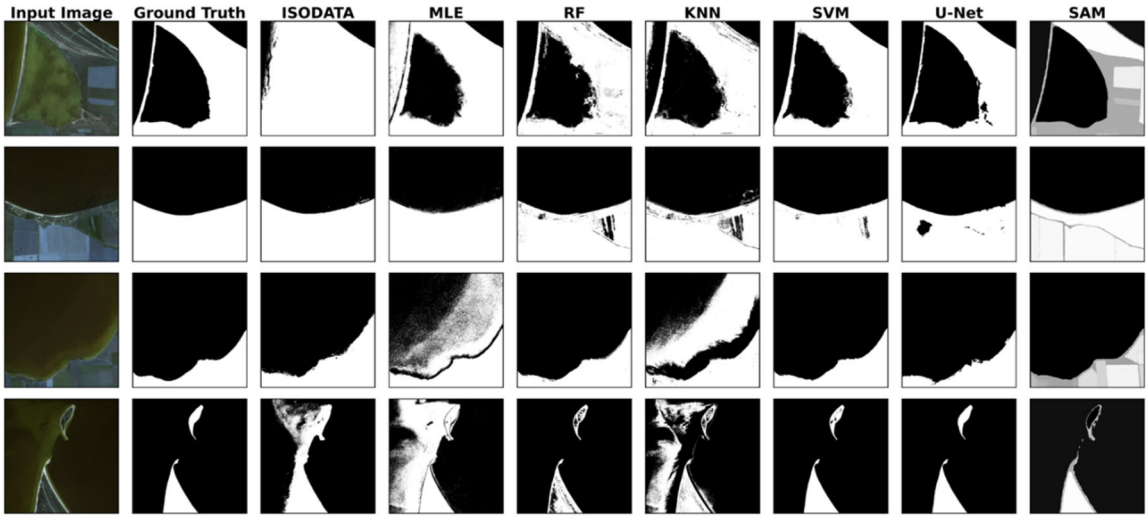


Fig. 5. Results of different sea-land segmentation methods based on PlanetScope imagery

Method	Mean Accuracy (%)	Mean Recall (%)	Mean Precision (%)	Mean F1-score (%)	Mean IoU (%)
ISODATA	84.5	65.99	99.87	77.32	65.97
MLE	78.56	55.74	**99.94**	66.71	55.73
RF	97.07	94.94	93.4	93.92	88.84
KNN	83.91	62.32	95.76	71.17	60.46
SVM	97.92	95.24	99.24	97.16	94.52
U-Net	**98.96**	**99.45**	97.27	**98.34**	**96.74**
SAM	97.91	91.45	95.7	93.5	88.53

Fig. 6. Quantitative comparison of sea-land segmentation methods based on 4 scenes. The SAM model clustered the land class into subclasses, this division is illustrated by a white gradient. Bold values indicate the best value

In evaluating methods for sea-land segmentation, it's important to use a variety of metrics that capture different aspects of performance, including accuracy, recall, precision, F1-score (Dice coefficient), and IoU (Jaccard index), as shown in Fig. 6. These metrics provide a broad picture of how each method does well in segmenting sea and land areas. Accuracy shows a general measure of the overall correctness of the predictions compared to the ground truth. On the other hand, recall evaluates how effectively a model identifies all relevant segments, ensuring that sea or land areas are not incorrectly classified as the opposite. Precision measures the model's ability to correctly identify positive instances without including false positives. The F1-score provides an overall sense of the balance between false positives and false negatives. Intersection over Union (IoU) quantifies the overlap between predicted and actual regions on a pixel-by-pixel basis, making it a vital metric for assessing segmentation models' agreement with the ground truth. The observed extremely high precision values suggest that methods such as ISODATA, MLE and SVM are employing overly stringent criteria for identifying positive instances. While this strategy effectively reduces false positives, it also leads to the omission of many true positives. Consequently, although this approach results in high precision, it adversely affects recall and compromises overall segmentation performance.

Discussion and conclusions

Through comparative analysis, these models reveal distinct strengths and weaknesses, offering valuable insights into their applicability for coastline extraction tasks. While traditional statistical methods like ISODATA and MLE provide solid theoretical foundations, their practical applicability is limited by computational complexity, recall to initialization limits and assumptions about data distributions. Machine learning models such as RF, KNN, and SVM offer improved performance and robustness, but can be hindered by computational demands and recall to hyperparameters.

Among these models, the U-Net model stands out as the most effective for sea-land segmentation. Its ability to perform end-to-end learning and handle variations in coastal environments make it superior to other methods. While other models like RF, SVM, and SAM offer reasonable performance, they fall short in handling fine details and complex coastal features compared to U-Net. Despite

requiring substantial computational resources and labeled training data, the benefits of U-Net in terms of accuracy and robustness make it the best choice for sea-land segmentation. The SAM model also shows promise, particularly for its versatility and transfer learning capabilities, though it may not yet surpass the task-specific performance of U-Net.

The comparative analysis underscores the superiority of the U-Net model for coastline extraction from remote sensing images. This research reinforces the conclusion that CNN-based models, specifically U-Net, are the best choice for sea-land segmentation tasks. In future work, it is recommended to further explore the integration of deep learning models with other machine learning techniques to enhance segmentation accuracy and efficiency. Additionally, the application of these models to a broader range of coastal environments and the incorporation of more diverse datasets could provide valuable insights into their generalizability and robustness.

Authors' contribution: Roman Okhrimchuk – methodology, data validation; Vsevolod Demidov – conceptualization, methodology, review and editing; Kateryna Sliusar – data treating, formal analysis.

References

Aguilar, M A., Saldaña, M., & Aguilar, F J. (2012). GeoEye-1 and WorldView-2 pan-sharpened imagery for object-based classification in urban environments. *Taylor & Francis,* 34(7), 2583–2606. https://doi.org/10.1080/01431161.2012.747018.

Ballinger, R., Smith, H. D., & Warren, L. M. (1994). The management of the coastal zone of Europe. *Elsevier BV,* 22(1), 45–85. https://doi.org/10.1016/0964-5691(94)90082-5.

Bayram, B., Erdem, F., Akpinar, B., Ince, A. K., Bozkurt, S., Catal Reis, H., & Seker, D. Z. (2017) THE EFFICIENCY OF RANDOM FOREST METHOD FOR SHORELINE EXTRACTION FROM LANDSAT-8 AND GOKTURK-2 IMAGERIES. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*., IV-4/W4, 141–145. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-141-2017.

Binet, R., Bergsma, E W J., & Poulain, V. (2022). ACCURATE SENTINEL-2 INTER-BAND TIME DELAYS. *Copernicus Publications*, V-1-2022, 57–66. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-v-1-2022-57-2022.

Bishop-Taylor, R., Nanson, R., Sagar, S. M., & Lymburner, L. (2021). Mapping Australia's dynamic coastline at mean sea level using three decades of Landsat imagery. *Elsevier BV*, 267, 112734–112734. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112734.

Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Coastal Education and Research Foundation*, 214, 688–703. https://doi.org/10.2112/03-0071.1.

Brudko, K., Okhrimchuk, R., & Demidov, V. (2022). Automatic Recognition and Damage Evaluation of Building Infrastructure in Seismic Active Zones using Machine Learning. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov. 2022,* Volume 2022, p.1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580199.

Chen, C., Fu, J., Zhang, S., & Zhao, X. (2019). Coastline information extraction based on the tasseled cap transformation of Landsat-8 OLI images. *Elsevier BV*, 217, 281–291. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.10.021.

Chollet, F. (2017). *Deep Learning with Python*. Manning Publications.

Colditz, R. R. (2015) An evaluation of different training sample allocation schemes for discrete and continuous land cover classification using decision tree-based algorithms. *Remote Sens*, 7, 9655–9681.

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (1982). Collection-2 Landsat 4–5 thematic mapper (TM) level-1 data products [Data set]. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.5066/F7N015TQ.

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2013). Collection-2 Landsat 8-9 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor) Level-2 Science Products [Data set]. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6.

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2018). Collection-1 Landsat 7 enhanced thematic mapper plus (ETM+) level-1 data products [Data set]. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.5066/F7WH2P8G.

ESA. (2021). eoPortal Directory – Satellite Missions Database. https://www.eoportal.org/satellite-missions.

ESA. (2022). The website of the European Space Agency – Spatial resolution categories of Earth observation data. https://earth.esa.int/eogateway/news/esa-ensures-quality-of-very-high-resolution-data-from-new-space-providers/spatial-resolution-categories-of-earth-observation-data.

Flores, A., Herndon, K., Thapa, R., & Cherrington, E. (2019). Synthetic aperture radar (SAR) Handbook: Comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation. https://doi.org/10.25966/NR2C-S697.

Ge, X., Sun, X., & Liu, Z. (2014). Object-oriented coastline classification and extraction from remote sensing imagery. SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2063845.

Gentleman, R., & Carey, V.J. (2008) Unsupervised Machine Learning. In Bioconductor Case Studies; Hahne, F., Huber, W., Gentleman, R., Falcon, S., Eds., pp. 137–157. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77240-0_10.

Gomez, C., Delacourt, C., Allemand, P., Ledru, P., & Wackerle, R. (2005). Using ASTER remote sensing data set for geological mapping, in Namibia. *Elsevier BV*, 30(1–3), 97–108. https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.042.

Hawkins, S J. (2012). Marine conservation in a rapidly changing world. *Wiley-Blackwell,* 22(3), 281–287. https://doi.org/10.1002/aqc.2239.

Hochberg, E J., Andréfouët, S., & Tyler, M. (2003). Sea surface correction of high spatial resolution ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 41(7), 1724–1729. https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.815408.

Hu, X., & Wang, Y. (2022). Monitoring coastline variations in the Pearl River Estuary from 1978 to 2018 by integrating Canny edge detection and Otsu methods using long time series Landsat dataset. *Elsevier BV*, 209, 105840–105840. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105840.

Joint Research Centre. (2017). New sensors benchmark report on WorldView-4: geometric benchmarking over Maussane test site for CAP purposes. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/872158.

Kalkan, K., Bayram, B., Maktav, D., & Sunar, F. (2013). Comparison of support vector machine and object based classification methods for coastline detection. *Copernicus Publications*, XL-7/W2, 125–127. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-7-w2-125-2013

Karslı, F. (2011). Spatio-temporal shoreline changes along the southern Black Sea coastal zone. *SPIE*, 5(1), 053545–053545. https://doi.org/10.1117/1.3624520.

Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A. C., Lo, W.-Y., Dollár, P., & Girshick, R. (2023). Segment Anything. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2304.02643.

Klinger, T., Ziems, M., Heipke, C., Schenke, H.W., & Ott, N. (2011) Antarctic Coastline Detection using Snakes Küstenliniendetektion in der Antarktis mit Hilfe von Snakes. *Photogramm. Fernerkund. Geoinf*., 421–434.

KOMPSAT-2 ESA Archive. (2017). https://doi.org/10.5270/ko2-2ijzzay.

Macchiarulo, V., Milillo, P., Blenkinsopp, C., Reale, C., & Giardina, G. (2023). Multi-temporal InSAR for transport infrastructure monitoring: recent trends and challenges. *Engineering Sustainability,* 176(2), 92–117. https://doi.org/10.1680/jbren.21.00039.

Maglione, P., Parente, C., & Vallario, A. (2014). Coastline extraction using high-resolution WorldView-2 satellite imagery. *Taylor & Francis*, 47(1), 685–699. https://doi.org/10.5721/eujrs20144739.

Liu, X. Y., Jia, R. S., Liu Q. M., Zhao C. Y., & Sun H. M., (2019) Coastline Extraction Method Based on Convolutional Neural Networks – A Case Study of Jiaozhou Bay in Qingdao, China. *IEEE Access,* 7, 180281–180291. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959662.

McAllister, E., Payo, A., Novellino, A., Dolphin, T., & Medina-López, E. (2022). Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Elsevier BV*, 174, 104102–104102. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104102.

Mellor, A. Boukir, S. Haywood, A. Jones, S. (2015) Exploring issues of training data imbalance and mislabelling on random forest performance for large area land cover classification using the ensemble margin. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*., 105, 155–168.

Menshov, O. I. (2016). Magnetic method applying for the control of productive land degradation. *Geofizicheskiy Zhurnal,* 38(4), 130–137. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107810.

Miao, Z., Fu, K., Sun, H., Sun, X., Yan, M. (2018). Automatic Water-Body Segmentation from High-Resolution Satellite Images via Deep Networks. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett*., 15, 602–60. https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2794545.

Nones, M. (2020). Remote sensing and GIS techniques to monitor morphological changes along the middle-lower Vistula river, Poland. *Taylor & Francis*, 19(3), 345–357. https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1742137.

Okhrimchuk, R., Demidov, V., & Brudko, K. (2022) Semantic segmentation of Western Crimean coastline for high resolution satellite images using deep learning based on U-Net architecture. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov. 2022,* Volume 2022, p.1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580213.

Okhrimchuk, R., Demidov, V., Sliusar, K., & Lukomskyi, V. (2024). Study on exogenous processes along the western coast of the Crimean Peninsula using deep learning methods. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv Geology*, 1(104), 124–131. https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.15.

Okhrimchuk, R., Tishaiev, I., & Zatserkovnyi, V. (2020). Anticlines Prediction Using Deep Learning. *NSG2020 26th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202020136

Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 9(1), 62–66. https://doi.org/10.1109/tsmc.1979.4310076.

Ouyang, Y., Chong, J., & Wu, Y. (2010). Two coastline detection methods in Synthetic Aperture Radar imagery based on Level Set Algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 31(17–18), 4957–4968. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.485142.

QuickBird-2 ESA archive. (2021). https://doi.org/10.5270/qb2-ftu9xmh.

Roelfsema, C., Kovács, É., Saunders, M I., Phinn, S., Lyons, M., & Maxwell, P. (2013). Challenges of remote sensing for quantifying changes in large complex seagrass environments. *Elsevier BV*, 133, 161–171. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.08.026.

Rouault, P., Courault, D., Flamain, F., Pouget, G., Doussan, C., Lopez-Lozano, R., McCabe, M., & Debolini, M. (2024). High-resolution satellite imagery to assess orchard characteristics impacting water use. *Agricultural Water Management*, 295(108763), 108763. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108763.

Sekovski, I., Stecchi, F., Mancini, F., & Del Rio, L. (2014) Image classification methods applied to shoreline extraction on very high-resolution multispectral imagery. *Int. J. Remote Sens*., 35, 3556–3578.

Seo, D., Oh, J., Lee, C., Lee, D H., & Choi, H. (2016). Geometric Calibration and Validation of Kompsat-3A AEISS-A Camera. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 16(10), 1776-1776. https://doi.org/10.3390/s16101776.

Shi, J., Shen, Q., Yao, Y., Li, J., Fu, C., Wang, R., Xu, W., Gao, Z., Wang, L., & Zhou, Y. (2022). Estimation of Chlorophyll-a Concentrations in Small Water Bodies: Comparison of Fused Gaofen-6 and Sentinel-2 Sensors. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute,* 14(1), 229–229. https://doi.org/10.3390/rs14010229.

Shin, C., Kim, S., & Kim, Y. (2020). From Planetscope To Worldview: Micro-Satellite Image Super-Resolution with Optimal Transport Distance. https://doi.org/10.1109/icip40778.2020.9190810.

Shirmard, H., Farahbakhsh, E., Müller, R D., & Chandra, R. (2022). A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. *Elsevier BV,* 268, 112750–112750. https://doi.org/10.1016 /j.rse.2021.112750.

SPOT 1-5 ESA archive. (2020). https://doi.org/10.5270/esa-6mxo3sr.

Tambe, R.G., Talbar, S.N., & Chavan, S.S. (2021) Deep multi-feature learning architecture for water body segmentation from satellite images. *J. Vis. Commun. Image Represent*, 77, 103141. https://doi.org/10.1016 /j.jvcir.2021.103141.

Tetteh, G. O., & Schönert, M. (2015). Automatic Generation of Water Masks from RapidEye Images. *Scientific Research Publishing,* 03(10), 17–23. https://doi.org/10.4236/gep.2015.310003.

Thanh Noi, P., & Kappas, M. (2018) Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. S*ensors*, 18. https://doi.org/10.3390/s18010018.

Toimil, A., Losada, Í. J., Nicholls, R. J., Dalrymple, R. A., & Stive, M. (2020). Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review. *Elsevier BV*, 156, 103611–103611. https://doi.org /10.1016/j.coastaleng.2019.103611.

Toure, S., Diop, O., Kpalma, K., & Maïga, A. S. (2019). Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute,* 8(2), 75–75. https://doi.org/10.3390/ijgi8020075.

Vajsová, B., Vincent, P., Faget, N., & Aastrand, P. (2015). New sensors benchmark report on SPOT7. https://doi.org/10.2788/17914.

Vajsová, B., Walczynska, A., Aastrand, P., Samuel, B., & Hain, S. (2015). New sensors benchmark report on WorldView-3. https://doi.org/10.2788/237561.

Vajsová, B., Walczynska, A., Samuel, B., Aastrand, P., & Hain, S. (2015). New sensors benchmark report on Kompsat-3. https://doi.org/10.2788/240349.

Vukadinov, D., Jovanovic, R., & Tuba, M. (2017). WSEAS Transactions on Computer Research. An *Algorithm for Coastline Extraction from Satellite Imagery,* 5(35–41).

Wei, C., Wei, H., Crivellari, A., Liu, T., Wan, Y., Chen, W., & Yang, L. (2023). Gaofen-2 satellite image-based characterization of urban villages using multiple convolutional neural networks. *Taylor & Francis,* 44(24), 7808–7826. https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2288948.

Wei, X., Zheng, W., Xi, C., & Shang, S. (2021). Shoreline Extraction in SAR Image Based on Advanced Geometric Active Contour Model. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 13(4), 642–642. https://doi.org/10.3390/rs13040642.

Xin, L., Li, Z., & Wang, S. (2022). Super-resolution research on remote sensing images in the megacity based on improved srgan. *ISPRS Annals of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-3–2022, 603–609. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-v-3-2022-603-2022.

Yang, C. (2018). High-resolution satellite imaging sensors for precision agriculture. *Higher Education Press*, 5 (4), 393–405. https://doi.org/10.15302/j-fase-2018226.

Zheng, H., Li, X., Wan, J., Xu, M., Liu, S., & Yasir, M. (2023). Automatic Coastline Extraction Based on the Improved Instantaneous Waterline Extraction Method and Correction Criteria Using SAR Imagery. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 15(9), 7199–7199. https://doi.org/10.3390/su15097199.

Zhou, X., Wang, J., Zheng, F., Wang, H., & Yang, H. (2023). An Overview of Coastline Extraction from Remote Sensing Data. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 15(19), 4865–4865. https://doi.org/10.3390/rs15194865.

Zatserkovnyi, V., Tishaiev, I., Virshylo, V., & Demydov, V. (2016). Geoinformation systems in Earth sciences. NDU im. M. Hoholia [in Ukrainian]. [Зацерковний, В., Тішаєв, І., Віршило, В., & Демидов, В. (2016). Геоінформаційні системи в науках про Землю. НДУ ім. М. Гоголя]. http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/28040

Отримано редакцією журналу / Received: 10.09.24
Прорецензовано / Revised: 13.10.24
Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Роман ОХРІМЧУК, асп.
ORCID ID: 0009-0009-4910-412X
e-mail: romanokhrimchuk@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Всеволод ДЕМИДОВ, канд. фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0009-0003-9472-6530
e-mail: demidov@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Катерина СЛЮСАР, магістр
ORCID ID: 0009-0001-2151-6562
e-mail: katyabru31@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МОДЕЛІ ГЛИБИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦІЇ МОРЕ-СУША НА ОСНОВІ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Вступ. ***Зміни берегової лінії можуть значно впливати на прибережний ландшафт, екосистеми та спільноти. Тому моніторинг такої високодинамічної системи, як море-суша, є актуальним завданням, яке можна вирішувати як традиційними методами, так і з використанням методів глибинного навчання для підвищення ефективності обробки такого класу завдань. Об'єктом дослідження є берегова лінія вздовж узбережжя західної частини Кримського півострова, вивчення якої традиційними методами стало неможливим через тимчасову окупацію Кримського півострова з 2014 року. У роботі розглянуто основні прибережні індикатори та методи переведення берегової лінії у цифровий формат. Проведено порівняння основних типів супутникових зображень, а також їх комбінацій для ефективного використання завдання картографування берегової лінії. Для розпізнавання та виділення берегових ліній на супутникових знімках використовується безліч методів, які в цілому поділяються на три групи: методи індексування, виявлення країв та класифікації.***

Методи. ***Автори порівнювали основні моделі глибинного навчання, які можна використовувати для ефективного розпізнавання берегової лінії та її кордонів на супутникових знімках, серед яких – ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), Maximum Likelihood Estimation (MLE), Random Forest (RF), K – Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machine (SVM), U-Net, і Segment Anything Model (SAM).***

Результати. ***На основі знімків PlanetScope було отримано контури берегової лінії Кримського півострова методами ISODATA, MLE, RF, KNN, SVM, U-Net, SAM. Проведено порівняння отриманих зображень та ефективності їх роботи. Дослідження включало розробку коду Python для автоматичного створення звітів, що містять інформацію про п'ять оцінювальних метрик, таких як точність (98,96), повнота (99,45), влучність (97,27), коефіцієнт Дайса (98,34) та індекс Жаккара (96.74), що полегшило оцінку різних підходів і методів.***

Висновки. ***Порівняльний аналіз наголошує на перевазі моделі U-Net для виділення берегової лінії на знімках дистанційного зондування. U-Net постійно забезпечує найбільш точну та детальну сегментацію у різних сценаріях, демонструючи стійкість та точність.***

Ключові слова: ***берегова лінія, методи глибинного навчання, згорткова нейронна мережа, модель U-Net, Кримський півострів.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Наукове видання

ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 4(107)

Відповідальний за випуск Олександр Меньшов
Chief publication manager Oleksandr Menshov

Комп'ютерна обробка статей Олеся Козіонова та Надія Тринос
Computer processing of the articles by Olesia Kozionova and Nadiya Trinos

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, відповідної галузевої термінології, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали.

Opinions, statements, accuracy of the quotations, economic and statistical data, terminology, proper names and other information are made on the responsibility of the authors. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit the submitted materials.

Формат 60x84 1/8. Ум. друк. арк. 15,3. Наклад 300. Зам. № 224-11194.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл4.
Підписано до друку 30.12.24

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 58; (38044) 239 31 28
e-mail: vpc@knu.ua; vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
http: vpc.knu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02