

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

Відповідальний за випуск О.І. Меньшов

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР	С.А. Вижва, д-р геол. наук, проф.
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	О.В. Шабатура, д-р геол. наук, доц. (заст. головн. ред.); О.І. Меньшов, д-р геол. наук, ст. дослідник (відп. секр.); В.Г. Бахмутов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; З.О. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О.В. Дубина, д-р геол. наук, В.М. Загнітко, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; В.І. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.; О.М. Іванік, д-р геол. наук, проф.; О.М. Карпенко, д-р геол. наук, проф.; І.М. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; О.Є. Кошляков, д-р геол. наук, проф.; В.Г. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; Б.П. Маслов, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О.В. Митрохин, д-р геол. наук, проф.; В.А. Михайлов, д-р геол. наук, проф.; Г.П. Міліневський, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; В.А. Нестеровський, д-р геол. наук, проф.; В.В. Огар, д-р геол. наук, проф.; М.І. Орлюк, д-р геол. наук, проф.; О.Л. Шевченко, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; В.В. Шевчук, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; С.Є. Шнюков, д-р геол. наук, доц.; Т.В. Пастушенко, канд. філол. наук, доц.; Т.А. Мірончук, канд. філол. наук, доц. Іноземні члени редакційної колегії: А. Веснавер, Італійський національний інститут океанографії та прикладної геофізики, Італія; Т. Діндароглу, Університет Кахраманмарас Сутцу Імам, Туреччина; А. Ель Албані, Університет Пуатьє, Франція; К. Зенг, Китайський геологічний університет, Китай; О. Івахненко, Казахстано-Британський технічний університет, Казахстан; А. Коронеос, Університет Арістотеля в Салоніках, Греція; К. Лі, Китайський геологічний університет, Китай; М. Олівія, Лісабонський університет, Португалія; П. Перейра, Університет Миколаса Ромеріса, Литва; В. Портнов, Карагандинський державний технічний університет, Казахстан; С. Спассов, Геофізичний центр Доурбес, Бельгія; В. Шмідт, Університет Мюнстера, Німеччина
Адреса редколегії	ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна ☎ (38044) 431 04 40; електронна адреса: geolvisnyk@ukr.net; http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua
Затверджено	Вченою радою ННІ "Інститут геології" 15 червня 2022 року (протокол № 15)
Атестовано	Вищою атестаційною комісією України. Постанова Президії ВАК України № 1-05/6 від 12.06.02
Зареєстровано	Міністерством юстиції України. Свідоцтво про Державну реєстрацію КВ № 23534-13374 від 08.08.18
Засновник та видавець	Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет" Свідоцтво внесено до Державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02
Адреса видавця	б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601, Україна; ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 72; факс 239 31 28

UDC 504+550+551+552+624

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

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

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

Chief publication manager O. Menshov

EDITOR-IN-CHIEF
EDITORIAL BOARD

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

Ukrainian Members:

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

Foreign members:

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

Address

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

Approved by the

Academic Council of the Institute of Geology
June 15, 2022 (Minutes # 15)

Certified by the

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

Certified by the

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

Founded and published by

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

Address

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

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

Нестеровський В., Деяк М., Тарновецький А.	
Літолого-мінералогічний склад акумулятивно-пляжних відкладів Дунайсько-Дністровського сегменту Чорного моря	5
Цар М.	
Уламки екзотичних метаморфічних сланців в олігоценічних відкладах Сілезького покриву (Українські Карпати)	14
Поляковська К., Іванік О., Аннеслі І.Р., Гест Н., Оцукі А.	
Ідентифікація та аналіз структурно-тектонічних особливостей території на основі лінеamentного аналізу: прикладі геомодельовання для території Канадського та Українського щитів	20

ГЕОФІЗИКА

Вижва С., Онищук В., Онищук І., Рева М., Шабатура О.	
Електричні та пружні властивості глибокозанурених ущільнених порід карбону центрального грабена ДДЗ	29
Меньшов О.	
Магнітомінералогічний аналіз ґрунтів як складова комплексної геолого-геофізичної моделі при пошуках вуглеводнів	39
Пірієв Р.	
Періодичність землетрусів у Каспійському морі	44
Шумлянська Л., Пігулевський П.	
Застосування поліноміальних поправок для побудови оптимальної одновимірної моделі густини мантії	51
Попов С., Бондар К., Хоменко Р., Бондарьков М., Максименко А.	
Методика геофізичного картування та моніторингу місць захоронення радіоактивних відходів	60

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Михайлов В., Курило М., Андрєєва О., Шнюков С.	
Перспективи промислової рудоносності прояву міді Жиричі	66
Даценко Л., Ганчук М., Чебанова Ю., Малюта С., Мазикіна О.	
Пологівське родовище каоліну: геологія, мінеральний та хімічний склад, технологічні властивості	74

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

Кошлякова Т., Кураєва І., Кошляков О., Олексенко Л., Швайка І., Проскурка Л.	
Мікроелементний склад питних підземних вод на території Коростишівського району Житомирської області у системі гідрогеохімічного моніторингу	85
Литвиненко Ю., Мельниченко Т., Кадошніков В., Шкапенко В.	
Археологічні стекла – модель для оцінювання стійкості осклованих радіоактивних відходів	92

ПОДІЇ

Гришук П.	
20-річчя Студентського осередку Товариства геофізиків-розвідників у Київському університеті!	97

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

Nesterovskiy V., Deiak M., Tarnovetskiy A.

Lithological and mineralogical structure of accumulative beach deposits of the Black Sea Danube-Dniester segment5

Tsar M.

Exotic metamorphic schist fragments in the Oligocene deposits of the Silesian nappe (Ukrainian Carpathians) 14

Poliakovska K., Ivanik O., Annesley I.R., Guest N., Otsuki A.

Identification and analysis of structural-tectonic features of geological terrains using lineament analysis:
examples of geomodelling for Canadian and Ukrainian shields.....20

GEOPHYSICS

Vyzhva S., Onyshchuk V., Onyshchuk I., Reva M., Shabatura O.

Electric and elastic properties of deep-seated consolidated rocks of Carboniferous period
of the central graben of the Dnieper-Donetsk Depression29

Menshov O.

Magnetic mineralogical analysis of soils as a part of the integrated geological and geophysical model
for the hydrocarbon prospecting39

Piriyev R.

Periodicity of earthquakes in the Caspian Sea44

Shumlianska L., Pigulevskiy P.

Application of polynomial corrections to construct an optimal one-dimensional density model of the mantle51

Popov S., Bondar K., Khomenko R., Bondarkov M., Maksymenko A.

Combination of geophysical techniques for mapping and monitoring of radioactive waste disposal facilities.....60

MINERAL RESOURCES

Mykhailov V., Kurilo M., Andreeva O., Shnyukov S.

Prospects of industrial ore-bearing of Zhyrychi ore occurrence.....66

Datsenko L., Hanchuk M., Chebanova Yu., Malyuta S., Mazykina O.

Pologivskiy kaolin deposit: geology, mineral and chemical composition, technological properties74

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

Koshliakova T., Kuraieva I., Koshliakov O., Oleksenko L., Shvaika I., Proskurka L.

Microelement composition of potable groundwater in Korostyshiv district of Zhytomyr region
in hydrogeochemical monitoring system.....85

Lytvynenko Yu., Melnychenko T., Kadoshnikov V., Shkapenko V.

Archaeological glasses – a model for the stability evaluation of the vitrified radioactive waste92

EVENTS

Gryshchuk P.

20th anniversary of the student chapter of exploration geophysicists at Kyiv university!97

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

E-mail: v.nesterovski@ukr.net,

ORCID 0000-0002-7065-8962,

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

M. Deiak, PhD (Geol.), Senior Researcher,

E-mail: nayk@ukr.net,

ORCID 0000-0002-9330-2766;

A. Tarnovetskyi, Graduate Student,

E-mail: youketeroamano22@gmail.com,

SSI "MorGeoEkoCenter" of NAS of Ukraine,

55-b O. Honchara Str., Kyiv, 01054, Ukraine

LITHOLOGICAL AND MINERALOGICAL STRUCTURE OF ACCUMULATIVE BEACH DEPOSITS OF THE BLACK SEA DANUBE-DNIESTER SEGMENT

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О. М. Іванік)

The investigations of accumulative-sand deposits of the Black Sea coastline on the area from the village Liman (Katranka spit) to the village Karolina Bugaz (Odessa region) have been carried out. The length of the coastal line in the study area is close to 85 km. There are a lot of beach areas: spits, beach breaks, beaches on the shoreline. 35 samples were taken and analyzed from all types of beach depressions by the same methodology during the summer period. The sampling was carried out at all accessible for sampling places of beach deposits from the middle part of the near-shore beaches (between the water level and the shore) and at a distance of 5–7 m from the water edge on the headlands and spits in the period when there are no storms. For this purpose we used standard plastic containers with a capacity of 1 liter. The samples were taken from a depth of 30 cm from the surface with a stripping area of 30×30 cm. At each point the description of the coastal zone structure and the character of beach deposits were carried out, which were recorded in the logbook and were connected to the coordinates by GPS system.

Granulometric and mineralogical analysis was carried out. It was determined that fractions 0,25–0,5 mm prevail in the granulometric composition among all types of beach deposits, which makes 66 %, and 0,1–0,25 mm – 30 %. In the smallest quantities there are coarse-grained and aleuro-pelitic fractions. The main places of localization of drilled-grained psammite and aleuropelite fractions are the areas with low influence of coastal tidal processes. However, during the periods of increased hydrodynamic activity (spring-autumn), additional resuspension of material takes place, which leads to displacement of other fractions from the deposits and their transfer to the sea side.

Beach sediments are 90–95 % quartz. Others are calcite, feldspar, technogenic substances. Ore minerals are represented by magnetite, lignite spheroids, ilmenite, acerbic garnets, stavrolite, actinolite.

The main sources of terrigenous material for the formation of beach deposits are the underwater bench, the Dniester river runoff, and coastal abrasion. Decisive in the distribution of sediments is the direction along the coastal current in the direction from Odessa city towards the delta of the Danube.

Keywords: Black Sea, beach deposits, granulometric composition, mineral composition.

Statement of the problem in a general way and its relation to important scientific or practical objectives.

Shoreline sediments are formed at the boundaries of aquifers and dry land. They form as a result of the combined action of many processes, the main ones being coastal erosion of the sea, bringing terrigenous material by river flow and the action of marine hydrodynamic processes. The fluvial and granulometric composition, volume and nature of the distribution of beach deposits indicate the peculiarities of the interaction of certain nutrient provinces, the morphology of the coastline and adjoining areas of the aquatorium. Beach sediments are sensitive to changes in the quantitative and qualitative parameters of runoff, the nature of abrasion and hydrodynamics, and can be used as indicators of certain events or transformational factors of their formation.

The north-western coast of the Black Sea within the borders of Ukraine covers the territory from the Danube delta to the Dniro-Buzsky estuary, stretching to the distance of 200 km and today is the most promising region to create recreation centers for the population. Natural beaches in this area are the main recreational element and are under the main anthropogenic pressure. However, well-developed and safe beaches are widespread only within the bumps and sandbars.

Investigation of accumulative and beach deposits will enable a geological and ecological assessment of the shoreline condition in the current mode, determine the lithologic and mineralogical composition of solid river flow

and assess their contribution to the coastal zone sediment balance, identify possible mineralogical provinces which inhabit the near-coastal part of the Black Sea and identify their main specialization.

Analysis of previous researches, publications and identification of previously unresolved parts of the general problem. Studies of the coastal zone of the western part of the Black Sea began in the late XIX – early XX century. N.I. Andrusov (Andrusov, 1890, 1927), A.D. Arkhangelsky (Arkhangelsky and Strakhov, 1938), and N.M. Strakhov (Strakhov, 1956, 1965) studied bottom sediments in the area and clarified the geological structure of the Black Sea basin.

In the second half of the XX century, the Institute of Geological Sciences of the NASU (E.F. Shnyukov (Shnyukov, 1981), V.X. Gevorkyan (Gevorkyan, 1981), M.G. Barkovskaya (Barkovskaya, 1960, 1963), E.Ya. Nevessky (Nevessky, 1967), Z.T. Novikova (Novikova, 1973)), the Okhotsk State University (Yu.D. Shuisky (Shuisky, 1986)), and the Institute of Mineral Resources of the NASU (Yurk, 1973), conducted systems survey of the shelf of the Black Sea, in which the main attention was given to the mineral deposits. In addition, the morphology of the coastal zone floor, geological structure of quaternary and modern bottom and near-shore deposits were investigated. A result of the mentioned investigations is a voluminous monograph publication "Geology of the shelf of Ukraine": Kerch stream (1981); Matter, history and exploratory methodology (1982); Solid mineral deposits

(1983); Stratigraphy (1984); Liman (1984); Lithology (1985). Three living mineralogical provinces were distinguished within the boundaries of the Black Sea: the Danube River; the Danube-Dniester River and the Dniester-Dnipro River (Shnyukov, 1983; Novikova, 1973). The features of drying and metallogeny of shelf mountain formations were determined. A monograph entitled "Problems of investigating sediment balance in the coastal zone of seas" was published (Shuisky, 1986).

Within the last 20 years beach deposits of the north-western part of the coast (at the Dniester-Danube area) have been investigated by a team of scientists of the Odessa I.I. Mechnikov National University (Yu. Shuisky (Shuisky and Murkalov, 2012; Shuisky and Organ, 2017), G. Vykhovanets (Vykhovanets, 2014), A. Murkalov (Murkalov, 2011), N. Berlinsky (Berlinsky, 2014), N. Fedoronchuk (Fedoronchuk, 2001), etc. The main topic of these works is devoted to the study of the mechanism of the accumulation of sediments on the coastal sediments and the description of their morphology. However, the mineral composition and the sources of its formation remain insufficiently studied, especially considering that accumulative and beach sediments are in dynamism all the time. The problem of genesis and accumulation of ore components of coastal deposits, such as gold, magnetite, garnet, ilmenite, etc., also remains unsolved.

Research goal. The main purpose of the present research is to determine current features of the formation of a granulometric and mineral composition of coastal beach beds of the north-western coastal part of the Black Sea in the area from the village Liman (Katran sandbar to the village Vistula). Liman (Katranka sandbar) to the village of Karolina Bugaz (Odessa region).

Factual material and research methods. The factual material was collected during the state administration of the branch of marine geology and siege mining issues of the Ukrainian National Academy of Sciences Center of Ukraine

on the theme "Lithological and mineralogical composition of the accumulative coastal marine deposits of the Black Sea (within the borders of Ukraine)".

Samples for lithological and mineralogical investigations were selected during the fieldwork in July 2019 according to the unified methodology. The sampling was carried out on all available sampling locations of beach beds in the middle part of the near-shore beaches (between the water level and the shore) and at a distance of 5–7 m from the water level on the headlands and spits during the period when there were no storms. For this purpose standard 1-litre plastic containers were used. The samples were taken at a depth of 30 cm from the surface with a stripping plane of 30×30 cm (Fig. 1). The coastal zone structure and the nature of the beach deposits were described at each point and logged and geo-referenced by GPS. A total of 35 samples was taken. The length of the coastal zone surveyed was 86 km (Fig. 2).



Fig. 1. Sampling of beach beds



Fig. 2. Schematic diagram of the survey and sampling area

In the laboratory the samples were dried and quenched according to accepted methods. For particle size analysis a 0.5 kg sieve was used. The test was performed on a standard set of sieves with the following fractions (mm): >10; 10–7; 7–5; 5–3; 3–2; 2–1; 1–0.5; 0.5–0.25; 0.25–0.1; <0.1. Each of the obtained fractions was quantified on the laboratory scale to 0.1 g, which were then converted into counts. According to the results of particle size analysis histograms were created. Electromagnetic and magnetic fractions were distinguished from each fraction by Sochnev magnet, which were subsequently investigated by the MBS 10 microscope, scanning electron microscope and electron-probe microanalysis. Some samples were separated in bromoform to obtain important and light mineral fractions.

Layout of the main study material. Beach sediments are understood as the primary elementary accumulative form of exogenic relief which was formed from coastal-marine deposits in the coastal zone of the sea. Beach sediments are localized, born and develop under the active influence of tidal currents in the coastal zone and subdivided into above-water and below-water parts (*Shuisky and Vykhovalnets*, 1989).

The beaches in the studied area are represented by spits (Katranka, Sasikska), persiques (Dnistrovskia, Budakhska, Shagani Alibei-Burnaska) that comprise up to 80 % of the coastline and by near 20 % of the narrower one.

The barrier necksand beaches are bordered on one side by estuaries (Dniester, Buda, Shagany, Alibeisk, Burnas, Sasik) and on the other side by the Black Sea. Their width

varies from several tens of metres to several hundreds of metres and their height above sea level is 1–3 metres. The steepness of the slopes of the transhumance and the seaward slopes is often steeper than that of the estuaries. Two or three shafts can be distinguished in the transversal profile of the headwaters and estuaries, corresponding to the different intensity of the tides. The first bank is located closer to the water surface and has an average height of 0.4–0.5 meters above the sea level, the second one is 8–12 meters above the water surface, with a height of 1–1.4 meters, and the third one is 25–35 meters above the water surface, with a height of 2–3 meters. The latter is the result of significant storm surges that occur here during the autumn-winter period. Sometimes the beach is seen as a separate pile, which is obviously related to the eolian activity along the coastline.

A beach is located in the coastal area between the villages Lebedivka-Kurortne. Their total length is about 18,5 km. The width of the beach is from 2–3 m up to 10–15 m. In some places the above-water part of the beach is absent and then the coastal zone is adjacent to the water level. The coastal zone is a cliff with steep (70–90°) walls up to 20 m high and more, where landslide and landslide processes are actively developing (Fig. 3, 4). The bottom of the cliffs often has a deep niche which is mostly oriented on the north-west, north. They are the result of storm surges from the eastward drift to the westward drift, which is typical for this part of the coastline. The coastline of the near-shore beaches is in general slightly sinuous and straight.



Fig. 3. General view of the coastline in the development area around the beaches



Fig. 4. Typical view of landslide development on the Lebedivka-Kurortny coastal line area

The geological structure of the coastline, which is in direct contact with the sea and is located above its level, involves quaternary deposits. In the area between the villages Lebedivka-Kurortne they are mainly represented by continental facies of forest-like loams, clays and dugout soils with black-brown clays in the bottom (Fig. 5). The above-water part of black-brown clays increases in the direction from Lebedivka to village Karolina Bugaz. These deposits occur on different rocks of Sarmatian, Miocene and Pliocene. The total thickness of the Quaternary deposits together with the underwater part is nearly 36 m, and on the overflow up to 55m (*Zelinsky et al.*, 1993).

In the study area, two major water arteries are located in the Black Sea: the Danube and the Dniester rivers. They deliver a large volume of discharged and terrigenous substances, which partly settle in deltas, estuaries and

levees but part of the material flows directly into the sea. Estimates of the flow of these rivers to the Black Sea vary from one author to another one. According to Romanian authors, in the last 155 years the Danube flow averaged 51.2 million tpy (before regulation, 87.8 million tpy) (*Bondar and Blendea*, 2000; *Jaoshvili*, 2003). Of this number, about 9–12 % are bottom sediments that settle in the delta and on the arm coast and do not take part in marine sediment accumulation (*Mikhailova*, 1995). Calculates of the Dniester River flow rate are 1.73 million tpy (2.5 million tpy before regulation) (*Jaoshvili*, 2003). The Dniester River forms a waterlogged delta, which is drained into the Dniester Estuary. The Dniester is an intermittent freshwater basin where the majority of the Dniester's flow is discharged, with a smaller proportion reaching the aquatorium indirectly.

Within the surveyed area from the north-eastern part to the south-western part along the coast there is a main cyclonic flow, which constantly influences the transfer of the material in the direction from the city Odessa to the delta of the Danube.

The results of granulometric analysis showed that the accumulative beach deposits of the Dniester and Danube segments are dominated by medium-grained (0.5–0.25) and fine-grained (0.25–0.1) psamite fractions (Fig. 6).

However, it should be noted that in the samples taken from over- and under-ice in the Liman-Lebedivka area the friable and medium-grained fractions are in approximately equal quantities, and starting from Lebedivka to Budatsky Liman the role of the medium-grained fraction grows. This division continues up to the Dniestrovsky Channel. The role of other grains sharply increases in the middle part of the

fairway, and from there to the Bugaz River again shows the dominance of medium-grained fraction (Fig. 7).

The coarse-grained (0.5–1 mm) fraction is widespread locally. The amount of grain size is generally insignificant and averages about 2 %. The largest fraction (12 %) is concentrated in the beach sediments between the Buda and Dniester Rivers. The points of maximum concentration of coarse-grained fraction coincide with the points of increasing concentration of medium-grained fraction. The volume of coarse-grained psamite fraction (2–1mm) varies in the range from 0 to 8 %. Its partitioning is not regular, has a local character. Gravel fraction is 2–3mm in size and has sporadic distribution. The maximum concentrations of their concentrations are associated with the accumulation points of coarse psammite fractions.

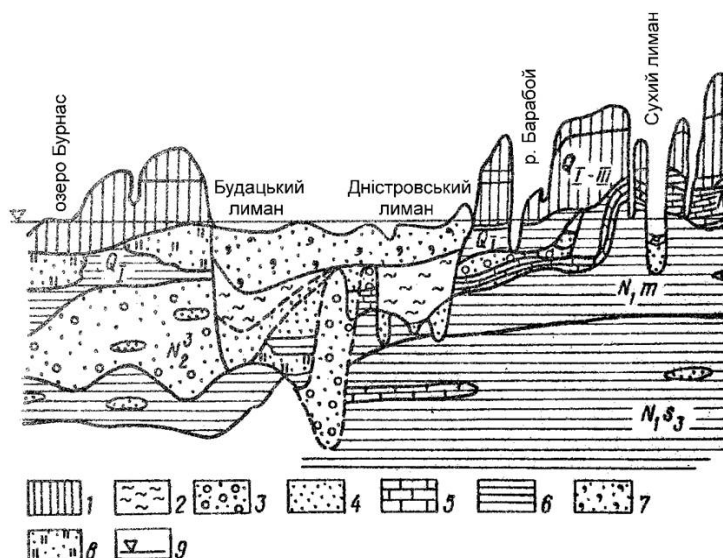


Fig. 5. Schematic coastal geologic cross-section on the Lebedivka-Karolina Bugaz plot.

The following definitions are used: 1 – forest-like loams; 2 – mules; 3, 4 – coarse- and fine-grained sand; 5 – bogs; 6 – clays; 7 – turtle-pebbles; 8 – mules, medium-grained sand; 9 – sea level (Zelinsky et al., 1993)

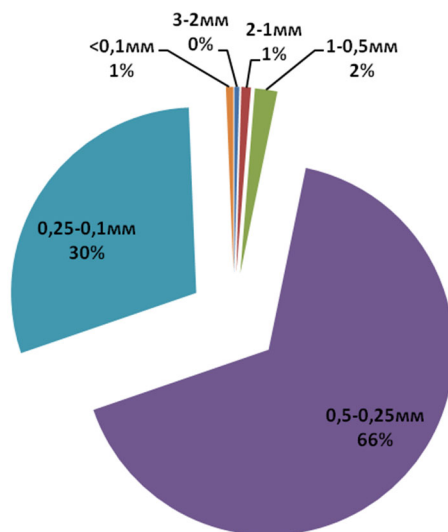


Fig. 6. Overall distribution of fractions in the accumulative beach deposits in the Danube-Dniester part

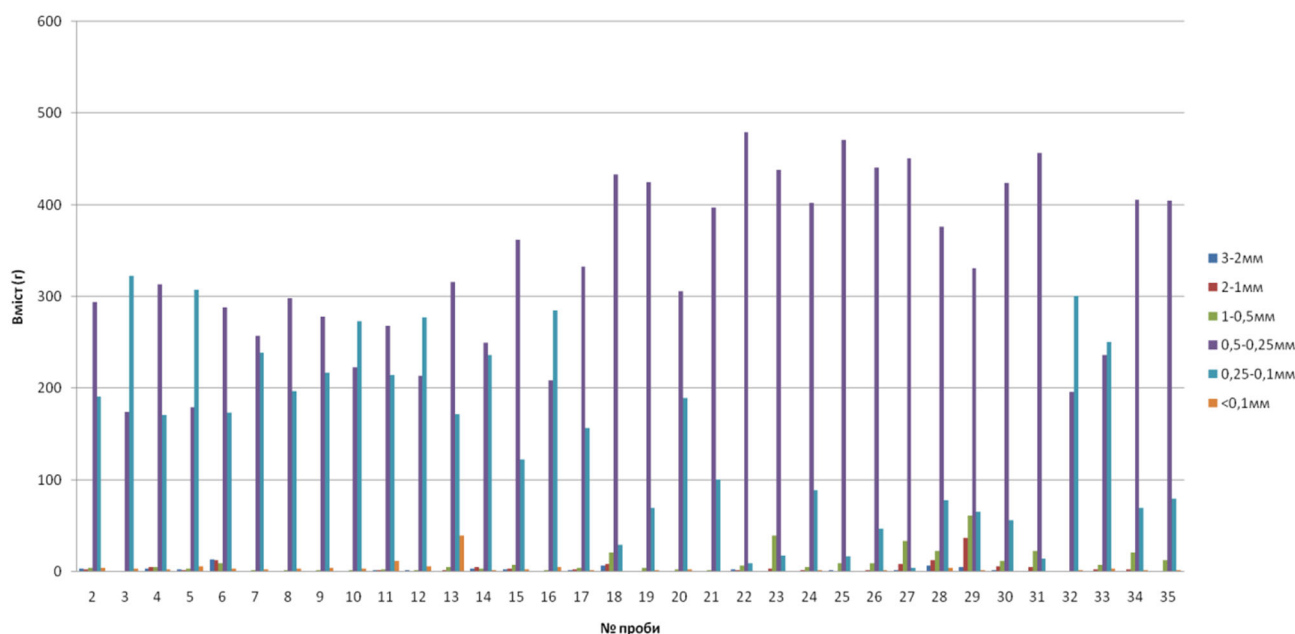


Fig. 7. Granulometric composition of accumulative beach sediments in the area of Liman village (Katranka barrier beach) – Karolina Bugaz (Odessa region)

The content of aleuropelite fraction (<0.1 mm) is also insignificant and varies in the range from 0 to 7 % and has a local character. This distribution indicates an active hydrodynamics in the coastal zone, significant processes of constant interchange and transfer of fine fractions in the territory.

The main places of localization of dry granular psammite and aleuropelitic fractions are areas with low influence of coastal tidal processes. However, during the periods of increased hydrodynamic activity (autumn-winter), additional significant resuspension of material takes place, which further leads to dislodging of other fractions from the deposits. Thus, in the transverse profile, the role of coarse fractions increases in the cross-sectional area between the water level and the third shaft. There is also a load of gravel and pebble fractions.

Also dynamic sorting of the material on all sections of the accumulative zones takes place. Timely drifts, local sand bar like bodies, underwater and offshore coastal barrier beach, over-slope, near-shore beaches are formed with overvaluation of medium-grained fractions at all points of observation.

The mineral composition of the accumulative beach sediments is generally monomagnetic. The main mineral of all types of deposits is quartz. Quartz accounts for an average of 90–95 %, the second-ranking minerals are calcite and calcitic detritus (3–6 %), feldspar (1–3 %).

The electromagnetic and magnetite fractions amount to 1–2 % in total. Their greatest volume is fractional 0,25–0,5 and 0,1–0,25 mm, where they are approximately distributed in the same proportions.

In the composition of the magnetic fraction magnetite, iron spheroids, iron technogenic formations, in the electromagnetic fraction – ilmenite, garnets, stavrolite, actinolite were established.

The major part of the low-magnetic fraction is represented by garnets. Besides this in single grains in the samples of zircon, rutile, hydroxide, pyroxenes, biotite, man-made glass and slag are present.

Coarse-clay material (gravel, pebbles) is composed of sandstones, limestones, siliceous nodules.

Most of the quartz (99 %) is dispersed in fractions smaller than 0.5 mm. In fractions 0.1–0.5 mm it is represented by isometrically transparent, well or moderately rounded grains of barren and white color (Fig. 8, a). Some of the grains show inclusions of luminescent minerals – ilmenite and hematite. In fractions smaller than 0.1 mm its compactness decreases sharply and is visible in the form of crystals. These crystals have a typical prismatic-dipyramidal habit and shape. Among the microcrystals there are two widespread color variations: light pink, transparent white (Fig. 8, b).

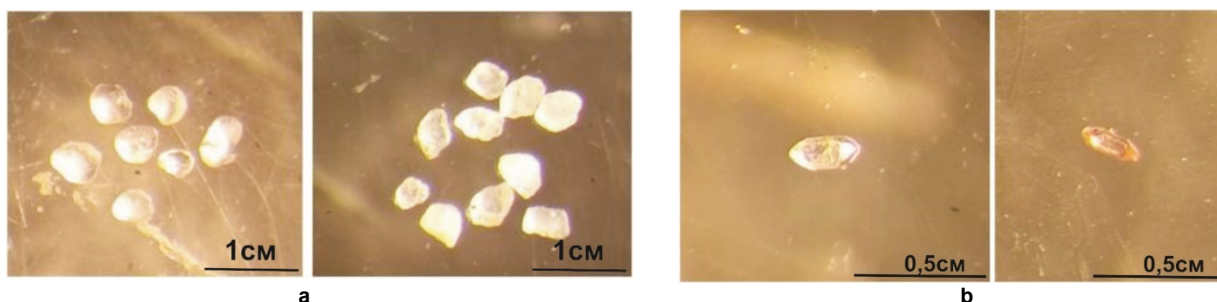


Fig. 8. Morphology of quartz grains and crystals: 0.1–0.5 mm fraction (a); crystals with a fraction less than 0.1 mm (b)

The detritus is mostly in fractions larger than 0.25 mm. The largest amount falls into coarse-grained and medium-grained psammitic fraction. It is represented by clumps of turtle fragments of continuous or lamellar shape (Fig. 9). The detritus density decreases markedly in the direction of diminishing in size. It is diversified by color and species composition. Fractions >2 mm contain larger sized tortoise snails or their complete forms. They belong to the molluscs

Cardium, Venus, Mytilus, Tapes, etc. The amount of turtle detritus in some places on the beach reaches a significant number, but in general decreases as the water level decreases to the beach depth.

Sulphurous calcite grains are opaque, have a rough oval shape and a rough surface and are concentrated in fractions larger than 0.25 mm. In fractions smaller than 0.25 mm their volume is drastically reduced.



Fig. 9. General view of detritus: 0.5–1 mm fraction (a); 1–2 mm fraction (b)

Polish feldspar is represented by rounded, non-porous or opaque prismatic grains of grayish-brown, reddish-brown color. Its distribution into fractions is not regular, but still significant concentrations are observed in other fractions.

Magnetite grains are well rolled, have an oval, close to isometric shape (Fig. 10). The color is brown with different tints due to the oxidation processes and the appearance of a membrane of hydroxides of iron on top. The samples also

contain single magnetite crystals of black octahedral habitus with metallic shine on the faces (Fig. 11).

The spheroids are set in fractions of 0.1–0.5 mm. They are diversely spherical, have a precise goblet-like shape with a smooth, glistening surface (Fig. 12). They are composed of 97.7–98 % iron. The impurities components are represented by magnesium, aluminum, silicon (Table 1). These spheroids were found in approximately one third of the investigated samples, where they are found in single units.



Fig. 10. Typical morphology of magnetite grains of 0.5–0.25mm fraction

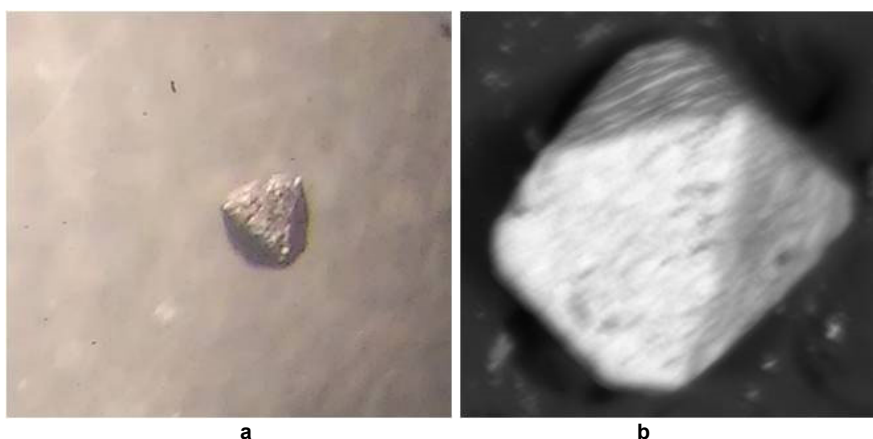


Fig. 11. Octahedral magnetite crystals: binocular (a); electron microscope (b)

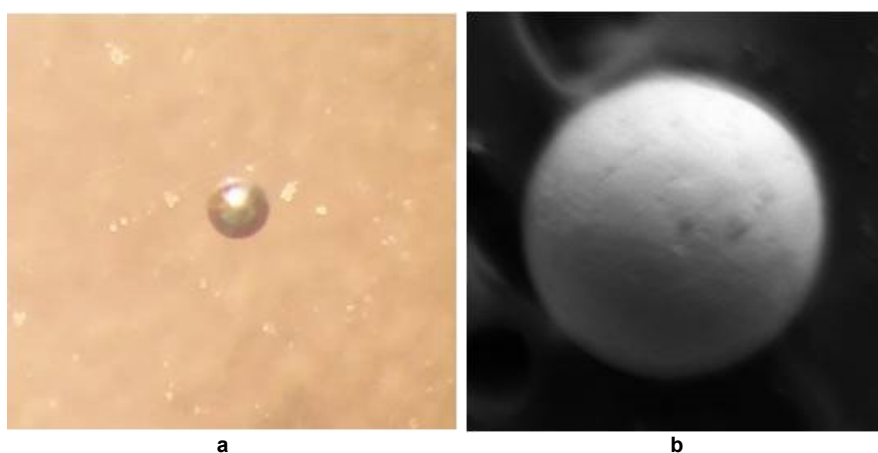


Fig. 12. Saline spheroids: binocular microscope (a); electron microscope (b)

Table 1

The chemical composition of the volumetric spheres

Sample	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	Sum
26_2	0,44	0,26	1,58	97,73	100

Among garnets, almandine is the most abundant. There are fewer variations between almandine and spessartine, with MnO quantity up to 26 %, and fewer variations between almandine and pyrope with MgO content up to 12 %.

The almandine is mainly represented by transparent, weakly or even uncoated grains with a light pink color (Fig. 13).

Garnets of intermediate composition between almandine and spessartine are marooned, maroon-black in colour and are transparent. They are even more highly rolled than almandine and are more or less isometric grains (Fig. 14).

The garnets of intermediate composition between almandine and pyrope have a rough black-and-white color, are porous and have an isometric shape of grains (Fig. 15).

A characteristic feature of all garnet varieties is their colourfulness, shapelessness and isometric shape.

Ilmenite is represented by nonporous slightly rolled grains of black color with a shiny surface (Fig. 16). It is found in all samples and occupies the second place after garnets.

Stavrolite is found in almost all samples and is quite widespread. Its presence is correlated to some extent with garnets. It is presented by prosoriated, mostly not rolled, more gradually filled grains of brown color of different tints (Fig. 17). It is characterized by the inclusion of other minerals, especially ilmenite, quartz, magnetite and apatite.

Actinolitic crystals are not present in all samples and are not widespread. They are represented by single isolated prismatic-ovoidal green crystals (Fig. 18). A characteristic feature of these crystals is their good preservation, they are not affected by rolling processes and the influence of distant transportation.

Technogenic substances are represented by silicon, aluminium and magnesium alloys. They have a rocky and gastrocuted shape, are opaque and often oxidized on top. They have a distinct metallic glare on fresh scales (Fig. 19). They are present in almost all samples, but their number increases rapidly in the direction from the Danube to the Dniester segment of the coast.



Fig. 13. Almandin fraction 0.25–0.5 mm



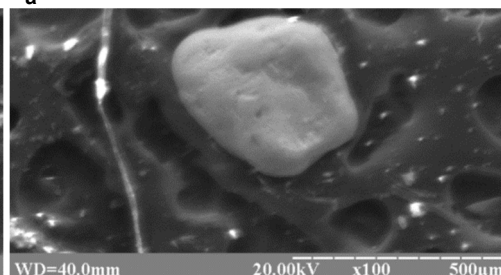
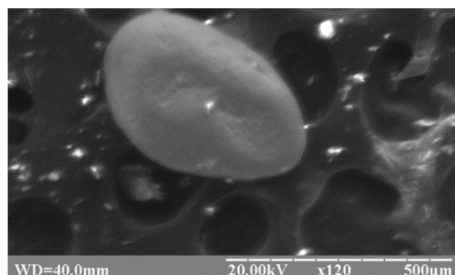
Fig. 14. Garnets of the almandine spessartine series, 0.25–0.5 mm fraction



Fig. 15. Almandin-Pyro series garnets, 0.25–0.5 mm fraction



a



b

Fig. 16. Ilmenite: binocular (a); electron microscope (b)



Fig. 17. Stavalite grains under a binocular microscope, 0.25–0.5 mm fraction



Fig. 18. Actinolitic crystals under binocular microscope, 0.25–0.5 mm fraction



Fig. 19. Technogenic iron alloys under binocular microscope, 0.25–0.5 mm fraction

Conclusions. The accumulative coastal-beach deposits of the Black Sea in the area between the Danube and the Dniester form along the entire coastal zone. The main part of the shoreline is formed along the entire coastal zone and is represented by the deposits of over- and near-shore beaches. The main part of the beach deposits is on the peninsula and barrier beach, and the part of near-shore beaches makes up not more than 20 % of the surveyed territory.

The material for the formation of shoreline deposits in the surveyed area comes from several sources. In our opinion, a significant amount of washed material, which forms the beach deposits of over- and under-ice, comes from bench, which is in direct contact with them or is located close to them. From the benches to the shore there come both quartz, sand and a significant amount of detritus, which we constantly find near the water level. The other important source is the sediment delivery from the Dniester estuary, which, taking into account the downstream direction, is deposited on the beaches of the whole coastal beach zone all the way to the Zhebryivsky cove. The third source is skeletal shore rocks, which are actively fouling. However, considering their lithologic structure (loam and clay), their frost products replenish the balance of only the nearest beach deposits and in rather limited quantities. Most of them, due to dispersion, are carried to the depth of the aquatorium by hovering processes. The fourth source is the Danube's solid stream. However, despite the considerably greater volume of discharge than the Dniester, its material is deposited mainly in the Zhebryjevo Bay and below it, on the side of the Romanian coast. Again, this is caused by a coastal current running from Odessa to the Danube.

The tumultuous processes in the coastal zone lead to a constant rearrangement of different fractional matter within different segments of the beach, but the main tendency of this rearrangement is preserved for a long time, as our research and the research of previous years have shown.

Among all types of beach deposits fractions 0.25–0.5 mm prevail which is 66 % and 0.1–0.25 mm – 30 %. The smallest quantities include coarse-grained and siliceous fractions. The main places of localization of drilled-grained psammite and aleuropelitic fractions are areas only with reduced influence of coastal tidal processes.

Beach sediments are 90–95 % quartz. Other mineral deposits include calcite, feldspar, technogenic formations. Ore minerals are represented by magnetite, lime spheroids, ilmenite, acerbic garnets, stavalite, actinolite.

References

- Andrusov, N.I. (1890). Preliminary report on participation in the Black Sea deep-sea expedition of 1890. *Russian Geographical Society. Geography*, 26(2), 380–400. [in Russian]
- Andrusov, N.I. (1927). Paleogeography of the Black Sea region. *Nature*, 6. [in Russian]
- Arkhangelsky, A.D., Strakhov V.M. (1938). Geological structure and history of the development of the Black Sea. L.: Report AN SSSR. [in Russian]
- Barkovskaya, M.G. (1960). Regularities of the distribution of heavy minerals in the strip of the beach and on the shelf of the Soviet coast of the Black Sea. Riga. *Proceedings of the Institute of Geology of the Latvian SSR*, 71–82. [in Russian]
- Barkovskaya, M.G. (1963). Some patterns of formation of industrial concentrations of heavy minerals in water bodies. *Geology of ores. fields*, 1, 50–64. [in Russian]
- Berlinsky, N.A. (2014). Some patterns of formation of suspended sediment fields in the mouth area of the Danube. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu: Heohrafichni ta heolohichni nauky*, 19(1), 34–42. [in Russian]
- Bondar, C., Blendea, V. (2000). Water and Sediment Transport by the Danube into the Black Sea during 1840–1995. *IOC-BSRC Workshop "Black Sea Fluxes". Workshop Report No. 145*. Paris: UNESCO, 58–63.
- Fedoronchuk, N.O. (2001). Litohiia donnykh vidkladiv ta umovy formuvannia rozsyviv na Pivnichno-Zakhidnomu shelfi Chornoho moria. Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.): 04.00.10. Kyiv. [in Ukrainian]
- Gevorkyan, V.Kh., Pavlov, A.V., Mitin, L.I. et al. (1981). Underwater studies of the Kalamitskoe nodule field with the help of a deep-sea submersible. *Report ASUSSR. Ser. B*, 1, 6–9. [in Russian]
- Jaoshvili, Sh. (2003). Rivers of the Black Sea. European Environment Agency, *Technical Report*, 71, 58. [in Russian]
- Mikhailova, M.V. (1995). Formation of the protruding delta of the Kiliya branch and sediment balance at the mouth of the Danube. *Water Resources*, 22(4), 489–495. [in Russian]
- Mitropolsky, A.Yu., Moiseeva, Ya.Ya. (1975). On the concentration of trace elements from sea water using chelate ion exchangers. *Problems of Hydrogeology and Engineering Soil Science*, 4, 171–175. [in Russian]
- Murkalov, A.V., Neveduk, V.V. (2011). Sediments of sea beaches as an indicator of the current state of the bay-bar of the Dniester Estuary Black Sea coast. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu: Heohrafichni ta heolohichni nauky*, 16(1), 34–45. [in Russian]
- Nevessky, E.Ya. (1967). Sedimentation processes in the coastal zone of the sea. M.: Nauka. [in Russian]
- Novikova, Z.T. (1973). Characteristic features and dynamics of the formation of terrigenous-mineralogical provinces of the north-west of the Black Sea. *Oceanology*, 13(2), 297–302. [in Russian]
- Shnyukov, E.F., Inozemtsev, Yu.I., Lyalko, V.I. et al. (1983). Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. Solid minerals. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

Shnyukov, E.F., Ogorodnikov, V.I., Inozemtsev, Yu.I., Frantseva, I.A. (1981). Terrigenous-mineralogical zoning of modern sediments of the Black Sea shelf of the Ukrainian SSR. *Report ASUSSR. Ser. B*, 1, 42–45. [in Russian]

Shuisky, Yu.D. (1986). Problems of studying the balance of sediments in the coastal zone of the seas. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]

Shuisky, Yu.D., Vykhovanets, G.V. (1989). Exogenous processes of development of accumulative coasts in the Northwestern part of the Black Sea. Moscow: Nedra. [in Russian]

Shuisky, Yu.D., Murkalov, A.B. (2012). Patterns of development of natural leaning one-slope beaches on the abrasion shores of the Black Sea. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu: Heohrafichni ta heolohichni nauky*, 17(3), 8–31. [in Russian]

Shuisky, Yu.D., Organ, L.V. (2017). The main patterns of development along the coastal sediment flow in the coastal zone of the Black Sea. *Austria-science*, 6, 4–8. [in Russian]

Strakhov, N.M. (1956). To the knowledge of diagenesis. Lviv: Lviv University, 3/4, 7–26. [in Russian]

Strakhov, N.M. (1965). Types of manganese accumulations in modern reservoirs and their significance for understanding the manganese-ore process. *Lithology and minerals*, 4. [in Russian]

Vykhovanets, G.V., Murkalov, A.B., Stoyan, A.A. (2014). Dynamic stability of the sizes of sandy beaches in the coastal zone of the Black Sea. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu: Heohrafichni ta heolohichni nauky*, 19(1), 53–68. [in Russian]

Yurk, Yu.Yu., Kashkarov, I.F., Polkanov, Yu.A., Eremenko, G.K., Yalovenko, I.P. (1973). Diamonds of sandy deposits of Ukraine. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

Zelinsky, I.P., Korzhenevsky, B.A., Cherkez, E.A., Shatokhina, L.N., Ibragimzade, D.D., Tsokalo, N.S. (1993). Landslides of the northwestern coast of the Black Sea, their study and forecast. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

Список використаних джерел

Андрусов, Н.И. (1890). Предварительный отчет об участии в Черноморской глубоководной экспедиции 1890 г. *Русское географическое общество. География*, 26(2), 380–400.

Андрусов, Н.И. (1927). Палеогеография Причерноморья. *Природа*, 6.

Архангельский, А.Д., Страхов В.М. (1938). Геологическое строение и история развития Черного моря. Л.: АН СССР.

Барковская, М.Г. (1960). Закономерности распределения тяжелых минералов в полосе пляжа и на шельфе советского побережья Черного моря. Рига. *Труды Института геологии Латвийской ССР*, 71–82.

Барковская, М.Г. (1963). Некоторые закономерности образования в водоемах промышленных концентраций тяжелых минералов. *Геология руд. месторождений*, 1, 50–64.

Берлинский, Н.А. (2014). Некоторые закономерности формирования полей взвешенных наносов в устьевой области Дуная. *Вісник Одеського національного університету: Географічні та геологічні науки*, 19(1), 34–42.

Выхованец, Г.В., Муркалов, А.Б., Стоян, А.А. (2014). Динамическая устойчивость размеров песчаных пляжей в береговой зоне Черного моря. *Вісник Одеського національного університету: Географічні та геологічні науки*, 19(1), 53–68.

В. Нестеровский, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: v.nesterovski@ukr.net,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
М. Деяк, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: nayk@ukr.net;
А. Тарновецький, асп.,
E-mail: youketeroamano22@gmail.com,
ДНУ "МорГеоЕкоЦентр НАН України",
вул. О. Гончара, 55б, м. Київ, 01054, Україна

ЛІТОЛОГО-МІНЕРАЛОГІЧНИЙ СКЛАД АКУМУЛЯТИВНО-ПЛЯЖНИХ ВІДКЛАДІВ ДУНАЙСЬКО-ДНІСТРОВСЬКОГО СЕГМЕНТУ ЧОРНОГО МОРЯ

Досліджено акумулятивно-пляжні відклади північно-західного узбережжя Чорного моря на ділянці від с. Лиман (коса Катранка) до смт Кароліна Бугаз (Одеська область). Довжина берегової лінії на ділянці дослідження становить близько 85 км. Тут поширені такі форми пляжних відкладів: коси, пересипи, присхилі пляжі. З усіх типів пляжних відкладів за єдиною методикою в літній період відібрано та проаналізовано 35 проб. Вибір проводився на всіх доступних для відбору місцях пляжних відкладів із середньої частини у присхилі пляжів (між урізом води та берегом) та на відстані 5–7 м від урізу води на пересипах та косах у період відсутності штормів. Для цього використовувалися стандартні пластикові контейнери ємністю 1 л. Проби відбиралися із глибини 30 см від поверхні з площею зачистки 30×30 см. У кожній точці проводився опис будови берегової зони та характеру пляжних відкладів, які фіксувалися у журналі та були прив'язані до координат системою GPS.

Проведено гранулометричний та мінералогічний аналізи. Встановлено, що в гранулометричному складі серед усіх типів пляжних відкладів переважають фракції 0,25–0,5 мм, що становить 66 % та 0,1–0,25 мм – 30 %. У мінімальних кількостях наявні крупнозернисті та алевропелітові фракції. Основними місцями локалізації дрібнозернистих псамітових та алевропелітових фракцій є ділянки з пониженням впливом уздовж берегових хвелеприбійних процесів. Проте в періоди збільшення гідродинамічної активності (осінь – зима) відбувається додатковий перерозподіл матеріалу, що спричинює вимивання з відкладів дрібних фракцій і їх віднавання в бік моря.

Пляжні відклади на 90–95 % складені кварцом. Другорядні – кальцит, польовий шпат, слюда, техногенні утворення. Рудні мінерали представлені магнетитом, залізними сфероїдами, ільменітом, акцесорні – гранатами, ставролітом, актинолітом.

Основними джерелами теригеного матеріалу для формування пляжних відкладів на досліджуваній ділянці узбережжя є: підводний бич, річковий стік Дністра та берегова абразія. Вирішальною у розподілі наносів є направленість уздовж берегової течії у напрямку від м. Одеса в бік Дунаю.

Ключові слова: Чорне море, пляжеві відклади, гранулометричний склад, мінеральний склад.

Геворкян, В.Х., Павлов, А.В., Митин, Л.И. и др. (1981). Подводные исследования Каламитского поля конкреций с помощью глубоководного аппарата. *Доклады АН УССР. Сер. Б*, 1, 6–9.

Джаошвили, Ш. (2003). Реки Черного моря. Европейское агентство по охране окружающей среды. *Технический отчет*, 71, 58.

Зелинский, И.П., Корженевский, Б.А., Черкез, Е.А., Шатохина, Л.Н., Ибрагимзаде, Д.Д., Цокало, Н.С. (1993). Оползни северо-западного побережья Черного моря, их изучение и прогноз. К.: Наукова думка.

Митропольский, А.Ю., Моисеева, Я.Я. (1975). О концентрировании микроэлементов из морской воды с помощью хелатных ионитов. *Проблемы гидрогеологии и инженерного грунтоведения*, 4, 171–175.

Михайлова, М.В. (1995). Формирование дельты выдвигания Килийского рукава и баланс наносов в устье Дуная. *Водные ресурсы*, 22(4), 489–495.

Муркалов, А.В., Неведюк В.В. (2011). Наносы морских пляжей как индикатор современного состояния пересыпи Днестровского лимана побережья Чорного моря. *Вісник Одеського національного університету: Географічні та геологічні науки*, 16(1), 34–45.

Невеский, Е.Я. (1967). Процессы осадкообразования в прибрежной зоне моря. М.: Наука.

Новикова, З.Т. (1973). Характерные черты и динамика образования терригенно-минералогических провинций северо-запада Черного моря. *Океанология*, 13(2), 297–302.

Страхов, Н.М. (1956). К познанию диагенеза. Львов: Львовский университет, 3/4, 7–26.

Страхов, Н.М. (1965). Типы накоплений марганца в современных водоемах и их значение для познания марганцево-рудного процесса. *Литология и полезные ископаемые*, 4.

Федорончук, Н.О. (2001). Літологія донних відкладів та умови формування розсипів на Північно-Західному шельфі Чорного моря. *Автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.10*. Київ.

Шнюков, Е.Ф., Иноземцев, Ю.И., Лялько, В.И. и др. (1983). Геология шельфа УССР. Твердые полезные ископаемые. Киев: Наукова думка.

Шнюков, Е.Ф., Огородников, В.И., Иноземцев, Ю.И., Францева, И.А. (1981). Терригенно-минералогическое районирование современных осадков Черноморского шельфа УССР. *Докл. АН УССР. Сер. Б*, 1, 42–45.

Шуйский, Ю.Д. (1986). Проблемы исследования баланса наносов в береговой зоне морей. Л.: Гидрометеиздат.

Шуйский, Ю.Д., Выхованец, Г.В. (1989). Экзогенные процессы развития аккумулятивных берегов в северо-западной части Черного моря. Москва: Недра.

Шуйский, Ю.Д., Муркалов, А.Б. (2012). Закономерности развития естественных приослоненных односклонных пляжей на абразионных берегах Черного моря. *Вісник Одеського національного університету: Географічні та геологічні науки*, 17(3), 8–31.

Шуйский, Ю.Д., Орган, Л.В. (2017). Основные закономерности развития вдоль берегового потока наносов в береговой зоне Черного моря. *Austria-science*, 6, 4–8.

Юрк, Ю.Ю., Кашкаров, И.Ф., Полканов, Ю.А., Еременко, Г.К., Яловенко, И.П. (1973). Алмазы песчаных отложений Украины. Киев: Наукова думка.

Bondar, C., Blendea, V. (2000). Water and Sediment Transport by the Danube into the Black Sea during 1840–1995. *IOC-BSRC Workshop "Black Sea Fluxes". Workshop Report No. 145*. Paris: UNESCO, 58–63.

Надійшла до редколегії 12.01.22

M. Tsar, Leading Engineer,
E-mail: maritsar14@gmail.com;
Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals
of the NAS of Ukraine,
3-a Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine

EXOTIC METAMORPHIC SCHIST FRAGMENTS IN THE OLIGOCENE DEPOSITS OF THE SILESIAN NAPPE (UKRAINIAN CARPATHIANS)

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

The study aims at analyzing the petrographic composition of exotic metamorphic schist clasts in the Oligocene deposits filling the Silesian Nappe in the south-western part of the Ukrainian Carpathians and reconstructing their possible source area. The methodology includes petrographic, sedimentological and comparative geological methods.

To achieve this goal, field research was carried out along the first right tributary of the Hysnyi Stream (the village of Uzhok, Velykoberezhnianskyi district, Transcarpathian region) and petrographic analysis of the selected samples of the exotic metamorphic schist clasts included in the Oligocene debris-flow deposits was performed.

The results of microscopic studies showed that these exotic rocks are represented by mica-quartz schist and garnet-muscovite-biotite-plagioclase-quartz schist with a low content of chlorite, carbonate and epidote. Mineral composition and structure/texture features suggest the rocks were metamorphosed under green schist and epidote-amphibolite facies. Similar exotic rock fragments were identified by Polish scientists in the south-eastern part of the Polish Carpathians in the Silesian Nappe, where possible source area of the exotic rocks is related to the Bukowiec Paleo-Ridge, which had been located between the Dukla and Silesian basins of the Carpathian sedimentary realm.

Scientific novelty. For the first time, the petrographic composition and textural and structural features of the exotic schists fragments included in the Oligocene deposits of the Silesian Nappe in the Ukrainian Carpathians (area of the village of Uzhok, Ukrainian Carpathians) are described. These schists are similar to the exotic rocks included in the Oligocene deposits of the Silesian Nappe in the Polish Carpathians, which may indicate the same source area.

Keywords: exotic rocks, metamorphic schists, Silesian Nappe, Ukrainian Carpathians.

Introduction. Exotic rocks (or simply "exotics") are the remnants of now buried under the Carpathian nappes source areas. They are a part of the clasts in the Carpathian sediments. The research of these rocks helps to solve the problems of paleogeographic and paleotectonic reconstructions, in particular, to outline the ancient submarine and overwater paleo-uplifts in the Carpathian Basin (so-called "cordilleras") which could have supplied the exotic debris (Danysh, 1973; Vyalov et al., 1981; Oszczypko, 2006; Cieszkowski et al., 2009; Golonka, 2011; Golonka et al., 2019; Gawęda et al., 2019 et al.). In the Ukrainian Carpathians, some of the most significant components of exotic formations are fragments of metamorphic schists (Fedushchak, 1962; Linetska, 1963; Vyalov et al., 1981; Tsar, 2018).

Exotic rocks have been recorded for a long time within the Silesian Nappe of the Ukrainian Carpathians. They are best developed in the Uzh river basin near village of Uzhok (Transcarpathian region), where Oligocene flysch deposits contain the clasts of the metamorphic schist, quartzite, marble, bioclastic limestone and other exotic rocks. The composition and origin of these rocks still remains unclear (Slaczka, 1961; Danysh, 1973; Gabinet et al., 1976; Kulchytskyi, 1977; Vyalov et al., 1981; Hnylko, 2000, 2011 et al.). Metamorphic schists can be the products of the mentioned paleo-uplifts denudation, and their petrographic analysis combined with a sedimentological study of the sediments containing exotics help to understand the nature of these source areas. It is an actual scientific problem.

History of the research. The stratigraphic and geological position of the layers with exotics in the sediments of the Silesian Nappe in the Ukrainian Carpathians was presented by Vacek (1881), Wójcik (1905), Łozyniak and Temnyuk (1971), Kulchytskyi et al. (1977), Gruzman and Smirnov (1985), Hnylko (2000) and others. Sedimentological features of the flysch deposits containing the exotic rock fragments were described by Slaczka (1961) and Hnylko (2000, 2011).

According to Slaczka (1961), deposits with exotics near the village of Bukowiec (Poland) form the sedimentary lens which continue in the Ukrainian Carpathians and are exposed near the village of Uzhok. The researcher believes that the

exotic rocks from these areas are similar and could have been deposited due to the activity of submarine gravitational landslides. Danysh (1973) also compares the exotic-bearing sediments located near the village of Uzhok with the similar sediments developed near the village of Bukowiec. According to Danysh, the presence of exotic rocks should be related to denudation of the ancient Fore-Dukla island ridge.

The purpose of the study is to petrographically analyze the metamorphic schists that make up the clasts in the Oligocene deposits developed in the south-western part of the Ukrainian Carpathians in the Silesian Nappe and to reconstruct their possible source area.

Methods. Petrographic, sedimentological and comparative-geological methods are used in the work. We performed a petrographic analysis of the representative samples of metamorphic schists selected from the clasts distributed in the Oligocene deposits exposed along the Little Polonyinka Stream – the first right tributary of the Hysnyi Stream flowing into the Uzh River near the village of Uzhok (Velykoberezhnianskyi district, Transcarpathian region). The sedimentological features of these exotic-bearing deposits were studied during field work in 2018–2019. The obtained results were compared with the published results of the study of the exotic rocks distributed in the Polish Carpathians (Slaczka, 1961; Slaczka, Wieser, 1962; Mochnacka, Tokarski, 1972; Tokarski, 1975; Bak et al., 2001; Ziemiński, Wolska, 2014 et al.).

Geological setting. The study area is located in the southwestern part of the Ukrainian Carpathians in the Silesian Nappe (see Fig. 1, A). The Oligocene deposits developed here are represented by the Krosno Formation (Kuzovenko, 2003 et al.) – the various bedded gray flysch represented mainly by turbidites. Clasts of the metamorphic schists and other exotic rocks are included into the debris-flow deposits which form the lens-shaped sedimentary layer with a thickness up to 40–60 m developed locally near the village of Uzhok among the Krosno turbidites. Exotic clasts are chaotically scattered among the clay-sand matrix. This chaotic layer was attributed to the Uzhok Olistostrome accumulated by series of the debris flows (Hnylko et al., 2021).

© Tsar M., 2022

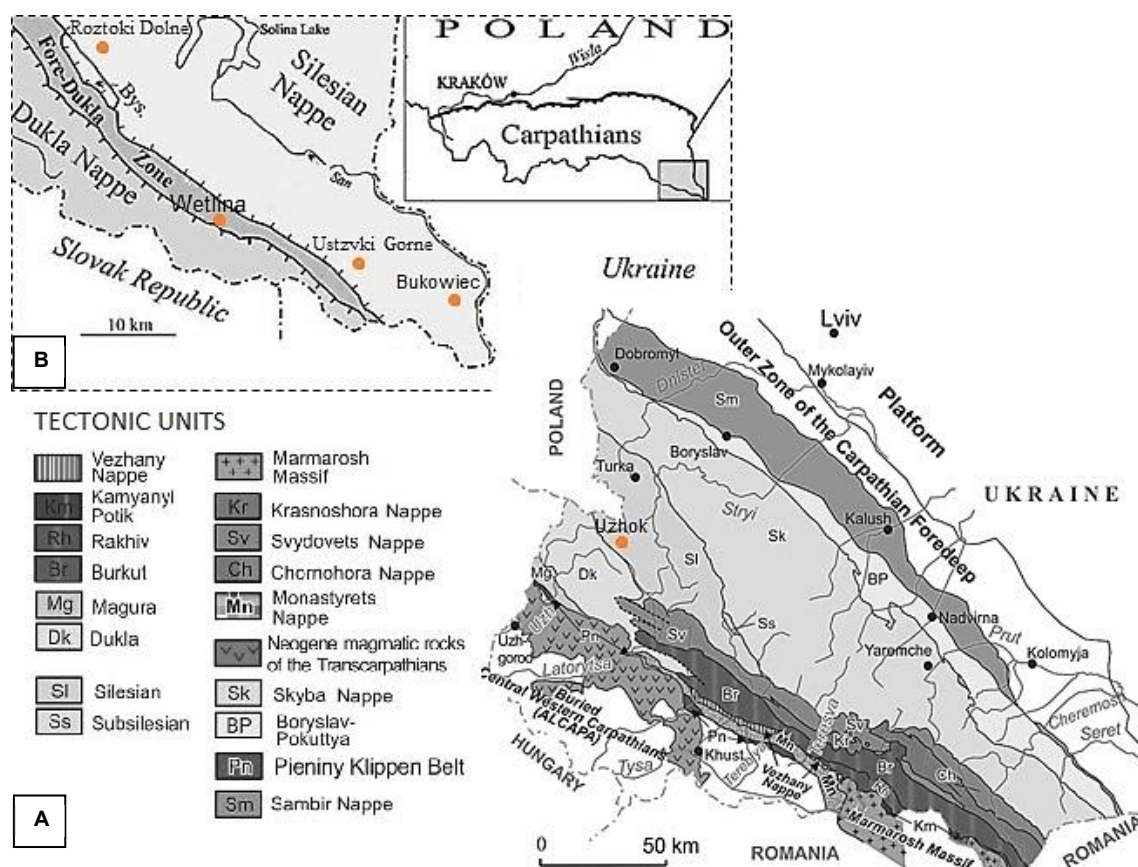


Fig. 1. A – tectonic scheme of the Ukrainian Carpathians according to (Hnylko, 2012, 2016) with the designation of the study area; B – localization of outcrops with fragments of exotic rocks in the Silesian Nappe of the Polish Carpathians on the tectonic scheme according to (Bak *et al.*, 2001)

Similar deposits occur in the Silesian Unit (Nappe) of the Polish Carpathians (see Fig. 1,B) (Wójcik, 1905; Slaczka, 1961; Slaczka, Wieser, 1962; Mochacka, Tokarski, 1972).

Results. Fragments of exotic metamorphic schists found along the Little Polonynka Stream (the right tributary of the Hysnyi Stream near the village of Uzhok) differ in size, rounding and composition (see Fig. 2). Most schist clasts are sub-angular, partly rounded, and somewhere angular ones with the corners sharp. Well-rounded clasts were rarely found. The color of the studied rocks is brown-gray and gray-green. The size is up to 25 cm.

Exotic clasts are included into the matrix represented by gray, dark gray, weakly cemented clay and clay-sandy deposits. The chaotic distribution of the exotic clasts in the matrix, lack of sorting and matrix-supported textures suggest the accumulation of the exotic-bearing deposits by the debris flows as it had been proposed previously by Hnylko (2000).

Fragments of metamorphic rocks were weathered and altered. We microscopically describe only two relatively unaltered samples of metamorphic rocks. Macroscopically, these rocks look like metamorphic crystalline schists and gneiss-like crystalline schist with garnet (see Fig. 2, 3 A, B).

Microscopically in the thin sections, the most representative metamorphic rock samples are identified as mica-quartz schist and garnet-muscovite-biotite-plagioclase-quartz schist with a small content of chlorite, carbonate and epidote (see Fig. 3, A-F).

Mica-quartz schist is characterized by a green-gray color with a brown shade. It has a schistose foliated texture. The structure is generally lepidoblastic.

The mineral composition of the rock is represented by quartz, mica minerals (biotite, sericite, muscovite) and

calcite. Recrystallization blasts of quartz represented by clusters of several grains/subgrains are clearly visible. Quartz blasts show characteristic undulatory extinction, which suggests deformation of their structure. (Fig. 3, C, E). Biotite was recorded in small quantities. The sample has aggregate formations of pelitomorphic-fine-crystalline calcite, as well as its branched veins up to 1 – 1.5 mm thick.

Most crystal grains are of the size not more than 0.05 mm and less common up to 0.1 mm. There are dissolution structures at the grain contacts (including microstylolites) which suggest increased pressure during the metamorphic processes.

Schistose texture is visible macroscopically as well as observed in optical microscopic study due to the developed mica-dominated and quartz-dominated irregular thin layers with the parallel arrangement of the micaceous minerals (Fig. 3, A-E). Such mineral orientation is developed as a result of the metamorphism under directed pressure. Presence of the mica-dominated and quartz-dominated layers suggests that a metamorphic change has taken place in terms of mineral distribution (see Fossen, 2016).

Mineral composition and structure/texture features suggest that mica-quartz schist had been metamorphosed in conditions of green schist facies under directed pressure.

Another sample represents porphyroblastic **garnet-muscovite-biotite-plagioclase-quartz schist** with a rare presence of chlorite, carbonate and epidote. The color of the schist is dark gray with a brownish shade.

The schistose foliated texture is visible macroscopically. The general porphyroblastic structure is caused by the garnet grain (up to 1–3 mm) included in the uniform small-medium-crystalline mass (see Fig. 3, D, F).



Fig. 2. Fragments of exotic metamorphic schists found in the sediments of the Krosno Formation exposed along the right tributary of the Hysnyi Stream (Silesian Nappe of the Ukrainian Carpathians).
A, B – mica-quartz schists; C – gneiss-like garnet-muscovite-biotite-plagioclase-quartz schists

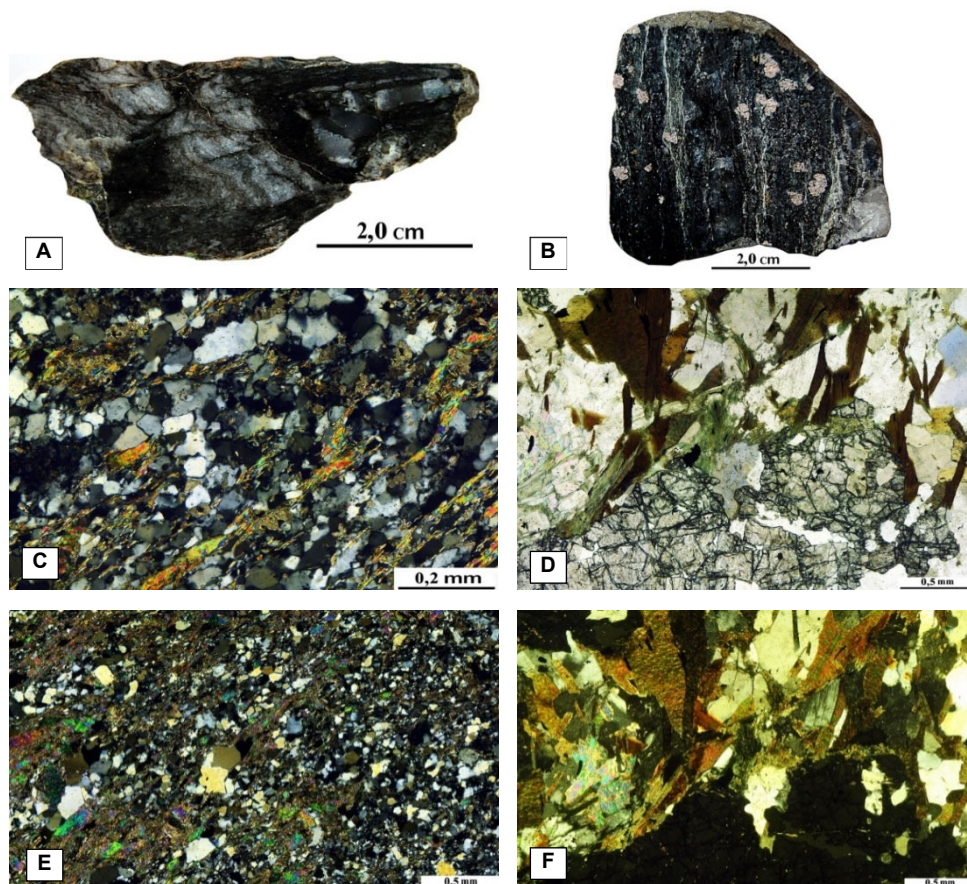


Fig. 3. Macro- and microphotographs of the exotic metamorphic schist filling the clasts in the Oligocene deposits of the Silesian Nappe (Ukrainian Carpathians, right tributary of the Hysnyi Stream flowing into the Uzh River, village of Uzhok).
A, C, E – mica-quartz schist. Nicole X; B, D, F – garnet-muscovite-biotite-plagioclase-quartz schist. D – Nicole II. F – Nicole X

The foliation and mineral orientated texture is not visible in optical microscopic study.

The main association of rock-forming minerals is the light mica (muscovite), quartz, biotite, garnet and albite. Planar minerals are represented by the ferrous biotite chloritized partly and muscovite with greenish shade and weak pseudoabsorption.

Clear features indicating deformation are not found in the rock. Mica is mostly not deformed and not split into individual fragments quartz does not show cracking and undulatory extinction.

The association of the main rock-forming minerals, in particular, the presence of garnet, may indicate that the rock was metamorphosed under conditions of higher greenschist facies up to the epidote-amphibolite facies.

The described crystalline schists are similar to exotic rocks found within the Silesian Nappe in the Polish Carpathians. For comparison, the published data of Polish scientists on exotic metamorphic rocks studied in the vicinity of Baligrod, Ustrzyki Górne, Bukowiec and Wetlina (Polish Outer Carpathians) are taken (see the table).

Table

Comparative table of the exotic metamorphic rock fragments in the deposits of the Silesian Nappe

Location	Baligrod, Roztoki Dolne (Poland) (according to <i>Ślaczka, 1961; Ślaczka, Wieser, 1962</i>)	Wetlina (the Bieszczady Mts, Poland) (according to <i>Bak et al., 2001</i>)	Ustrzyki Górne (Poland) (according to <i>Mochacka, Tokarski, 1972</i>)	Bukowiec (Poland) (according to <i>Ślaczka, 1961</i>)	Uzhok (Ukraine) (own data)
The age of the stratum containing the exotic rocks	Oligocene	Oligocene	Oligocene	Oligocene	Oligocene
The composition of metamorphic exotics	phyllites, albites, amphibolites and quartzites	crystalline schist (quartz-chlorite-muscovite-orthoclase schist with tourmaline and garnet)	chlorite-muscovite schists with garnet	dark green mica schists, rarely gray and white marbles and quartzites	schists, gneiss-like schists with garnet, gravelites, quartzites, marbles, quartz pebbles
The composition of the matrix	unstratified gray calcareous siltstones	light and dark gray clay partly sandy calcareous sediments	–	–	gray and dark gray clay-sand sediments
Probable source area	paleoislands between the Dukla and Silesian subbasins, which were probably a north-western continuation of the Marmarosh Massif	Paleo-uplift between the Dukla and Silesian subbasins	north-western continuation of the Marmarosh Massif between the Dukla and Silesian subbasins	Continuation of the Marmarosh Massif	Bukowiec Ridge, which supplied material for the part of the Silesian Basin (<i>Ślaczka, Golonka, 2006</i>)
Type of metamorphism	Progressive metamorphism in the conditions of epidote-amphibolite facies and regressive metamorphism associated with tectonic activity	a products of two types of metamorphism: progressive, medium-level and retrogressive, low-level	metamorphosed under conditions of greenschist facies	products of regional metamorphism	metamorphosed in the conditions of greenschist facies and epidote-amphibolite facies

Exotic crystalline schists (quartz – chlorite – muscovite – orthoclase schist with tourmaline and garnet) were identified near the village of Wetlina (Bieszczady Mountains) among Oligocene flysch deposits.

Petrographic analysis of these rocks showed that they are the product of two types of metamorphism: progressive, medium-level and retrogressive, low-level (*Bak et al., 2001*).

Also, a fragment of chlorite-muscovite schist with garnet was found in the Krosno deposits near the village of Ustrzyki Górne. This exotic schist was formed as a result of regional metamorphism, probably of the greenschist facies of the quartz-albite-epidote-almandine subfacies (*Mochacka, Tokarski, 1972*).

Exotic rocks in the Baligrod area were studied in detail by *Ślaczka and Wieser (Ślaczka, Wieser, 1962)*. There, the exotic fragments in Oligocene sediments are represented by metamorphic schists, quartzites, marbles, and amphibolites (*Ślaczka, 1961*). Microscopic studies have shown that crystalline exotics of this region can be classified as phyllites, albites and amphibolites. These rocks are the products of regional metamorphism of mainly pelitic sedimentary rocks (*Ślaczka, Wieser, 1962*).

Similar exotic rocks were also found in the area of the village Bukowiec (*Ślaczka, 1961*), where clasts of

metamorphic rocks, rarely gray-white marbles and limestones are among the Oligocene Krosno deposits. Fragments of metamorphic rocks are represented by "green-gray phyllites, albite-calcite gneiss phyllites, garnet phyllites, epidote-albite amphibolites, quartzites and whitish marbles" (*Ślaczka, Golonka, 2006*). *Ślaczka and Golonka (2006)* suggest that the source area for the exotic fragments was the Bukowiec Ridge located between the Dukla and the Silesian sedimentary basins. Bukowiec Ridge supplied exotics during Late Cretaceous – Oligocene time. These authors believed that the Bukowiec Ridge was composed of metamorphic rocks with a sedimentary cover.

You can see that the exotic metamorphic rocks filling the clasts in the Oligocene sediments of the Silesian Nappe of both the Polish and Ukrainian Carpathians are generally similar to each other in composition, textural and structural features and the metamorphic conditions. It suggests the single source area for these exotics.

Conclusions. In the south-western part of the Ukrainian Carpathians, the Oligocene flysch-type mainly turbidite deposits (Krosno Formation) of the Silesian Nappe contain a stratum (40–60 m in thick) of the debris-flow exotics-bearing deposits located near the village of Uzhok (Transcarpathian region). The debris-flow deposits are

composed of clay-sandy matrix and clasts of the exotic rocks including metamorphic schists, quartzites, marbles, bioclastic limestones.

Petrographic study showed that the most representative samples of the metamorphic schists of this stratum are: 1) mica-quartz schist and 2) garnet-muscovite-biotite-plagioclase-quartz schist.

The first sample (mica-quartz schist) is characterized by a schistose foliated texture and generally lepidoblastic structure. The main minerals are quartz, biotite, sericite, muscovite and calcite. Quartz blasts show characteristic undulatory extinction, which suggests deformation of their structure. Presence of the parallel arrangement of the micaceous minerals as well as the mica-dominated and quartz-dominated layers suggests that a metamorphic change and mineral distribution has taken place under directed pressure.

The second sample (garnet-muscovite-biotite-plagioclase-quartz schist) is characterized by a schistose foliated texture and porphyroblastic structure caused by the garnet grain. The main association of rock-forming minerals is light mica (muscovite), quartz, biotite, garnet, and albite. Clear features indicating deformation are not found in the rock.

Mineral composition and structure/texture features suggest the green schist metamorphic facies for the rocks of the first sample and the epidote-amphibolite facies for the ones of the second sample.

The results of the petrographic analysis of the exotic metamorphic rocks from the clasts included in the Krosno Formation of the Silesian Nappe both in the Ukrainian Carpathians (near village of Uzhok) and in the Polish Carpathians (Baligrod, Ustrzyki Górne, Bukowiec and Wetlina) suggest that these rocks have the single source area.

We believe following Ślaczka and Golonka (2006) that the source area for the exotic fragments was the Bukowiec Ridge located between the Dukla and the Silesian sedimentary basins. This paleo-ridge was likely to be a source of the exotic schists for the Oligocene sediment not only of the Polish Carpathians, but also of the Ukrainian Carpathians.

Prospects for further research are related to the reconstruction of the geological position, petrographic analysis and determining the absolute age of the metamorphic exotic rocks in the Ukrainian Carpathians. It is also necessary to continue the comparison of similar exotic fragments in the deposits of the Polish, Slovak and Romanian Carpathians. Comprehensive research will help to understand certain problems of paleogeographic and paleotectonic reconstructions of this region and contribute to the forecasting of deep buried mineral deposits.

Acknowledgments: The author thanks Dr. O. Hnylko for valuable comments. She also thanks Dr. S. Hnylko and Dr. L. Heneralova for collective expeditions and Dr. Yu. Fedoryshyn for help with the petrographic analysis.

References

- Bąk, K., Rubinkiewicz, J., Garecka, M., Machaniec, E., Dziubińska, B. (2001). Exotics-bearing layer in the Oligocene flysch of the Krosno Beds in the Fore-Dukla Zone (Silesian Nappe, Outer Carpathians), Poland. *Geologica Carpathica*, 52 (3), 159–171.
- Cieszkowski, M., Golonka, J., Krobicki, M., Ślaczka, A., Oszczytko, N., Waśkowska, A., Wendorff, M. (2009). The Northern Carpathians plate tectonic evolutionary stages and origin of olistoliths and olistostromes. *Geodynamica Acta*, 22 (1), 101–126. DOI: 10.3166/ga.22.101–126
- Danysh, V.V. (1973). Geology of the western part of the southern slope of the Ukrainian Carpathians. Kyiv: Naukova Dumka. [in Ukrainian]
- Fedushchak, M.Y. (1962). Conditions for the formation of exotic conglomerates of the Precarpathians vorotyshchenskoyi series. Kyiv: Publishing house of the USSR Academy of Sciences. [in Ukrainian]
- Fossen, H. (2016). Structural Geology. Second ed. USA: Cambridge University Press.

Gabinet, M.P., Kulchitskiy, Ya.O., Matkovskiy, O.I. (1976). *Geologiya i poleznye iskopayemye Ukrainskikh Karpat*. Ch. 1. Lviv: Vyscha shkola. [in Russian]

Gawęda, A., Golonka, J., Waśkowska, A., Szopa, K., Chew, D., Starzec, K., Wiczorek, A. (2019). Neoproterozoic crystalline exotic clasts in the Polish Outer Carpathian flysch: remnants of the Proto-Carpathian continent? *International Journal of Earth Sciences*, 108, 1409–1427. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01713-x>

Golonka, J. (2011). Evolution of the Outer Carpathian Basins. In: M. Bąk, M. Kaminski and A. Waskowska (Eds.) Integrating Microfossil Records from the Oceans and Epicontinental Seas. *Grzybowski Foundation Special Publication*, 17, 3–14.

Golonka, J., Waśkowska, A., Ślaczka, A. (2019). The Western Outer Carpathians: Origin and evolution. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 170 (3–4), 229–254. DOI: 10.1127/zdgg/2019/0193

Guzman, A.D., Smirnov, S.E. (1985). Olistostrome in the Krosno Formation of the Ukrainian Carpathians. *Doklady AN USSR, Seriya B*, 4, 18–21. [in Russian]

Hnylko, O., Hnylko, S., Heneralova, L., Tsar, M. (2021). An Oligocene olistostrome with exotic clasts in the Silesian Nappe (Outer Ukrainian Carpathians, Uzh River Basin). *Geological Quarterly*, 65 (4). DOI: <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1616>

Hnylko, O.M. (2000). Chaotic formation of south-western part of the Krosno Zone – the products of origin and development of Dukla Nappe (Ukrainian Carpathians). *Geodynamics*, 3, 65–74. [in Ukrainian]

Hnylko, O.M. (2012). Tectonic zoning of the Carpathians in terms of the terrane tectonics. Article 2. The Flysch Carpathian – ancient accretionary prism. *Geodynamics*, 12, 67–78. [in Ukrainian]

Hnylko, O.M. (2016). Geological structure and evolution of the Ukrainian Carpathians. *Extended abstract of Doctor's thesis*: 04.00.01. Lviv. [in Ukrainian]

Hnylko, O.M. (2011). Principles of distinguishing, features, classification and genesis of the olistostromes and melanges of the Ukrainian Carpathians. *Visnyk of the Lviv University. Geology Series*, 25, 20–35. [in Ukrainian]

Kulchitskiy, Y.O. (1977). Olistoliths, olistostromes and other submarine landslide phenomena in the flysch of the Eastern Carpathians. In: Y. Kulchitskiy and O. Matkovskiy (Eds.) *Geologia i poleznye iskopayemye Ukrainskikh Karpat*. Ch. 2, 44–54. Lviv: Vyscha shkola. [in Russian]

Kuzovenko V.V. (Ed.). (2003). State Geological Map of Ukraine. Scale 1: 200 000. Carpathian series. Sheet "Snina". State Geological Survey. [in Ukrainian]

Linetska, L.V. (1963). Conglomerates of Cretaceous and Paleogene of the northern slopes of the Carpathians and their significance for the paleogeography. *Extended abstract of Cand. thesis*. Lviv. [in Russian]

Loznyiuk, P.Yu., Temnyuk, F.P. (1971). Chapter 4. The geological structure of the Carpathians. Stratigraphy. Cenozoic Group. Paleogene System. Silesian Zone. In: W.W. Glushko and S.S. Kruglov (Eds.) *Geologicheskoye stroeniye i goryuchiye iskopayemye Ukrainskikh Karpat*, 150–154. Moscow: Nedra. [in Russian]

Mochnacka, K., Tokarski, A. (1972). A new occurrence of exotic blocks in the Krosno Beds near Ustrzyki Górne (Bieszczady range, Polish Eastern Carpathians). *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 42 (2–3), 229–238. [in Polish]

Oszczytko, N. (2006). Late Jurassic-Miocene evolution of the Outer Carpathian fold-and-thrust belt and its foredeep basin (Western Carpathians, Poland). *Geological Quarterly*, 50 (1), 169–194.

Ślaczka, A. (1961). Exotic-bearing shale from Bukowiec (Polish Eastern Carpathians). *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 31 (1), 129–143. [in Polish]

Ślaczka, A. (1963). Couches de Krosno inférieures de Roztoki Dolne – Karpates Polonaises Orientales. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 33, 181–187. [in Polish]

Ślaczka, A., Golonka, J. (2006). Remarks on evolution of west and east Outer Carpathians and on the Bukowiec Ridge. *Proceedings of 17th Congress Carpathian-Balkan Geological Association* (M. Sudar, M. Ercegovac and A. Grubic (Eds.)), 558–561. Serbian Geological Society. Belgrade.

Ślaczka, A., Wieser, T. (1962). Shales with exotics in the Krosno Beds of the Baligrod region (Polish Eastern Carpathians). *Kwartalnik Geologiczny*, 6, 662–667. [in Polish]

Tokarski, A.K. (1975). Geology and geomorphology of the Ustrzycki Górne area (Polish Eastern Carpathians). *Studia Geologica Polonica*, 48, 7–90. [in Polish]

Tsar, M.M. (2018). Conglomerates with the exotic material in the Ukrainian Carpathians – distribution, composition, probable genesis. *Geodynamics*, 1(24), 40–50. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.040> [in Ukrainian]

Vacek, M. (1881). Beiträge zur Kenntnis der mittelkarpatischen Sandsteinzone. *Jahrbuch der geol. k.k. Reichsanstalt*, 31, Wien, 191–208. [in German]

Vyalov, O.S., Gavura, S.P., Danysh, V.V., Leshchuch, R.J., Ponomaryova, L.D., Romaniv, A.M., Tsizh, I.T. (1981). History of the geological development of the Ukrainian Carpathians. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian]

Wójcik, K. (1905). Lower Oligocene from Rishkania near Uzhok. *Rozprawy wyd. mat.-przyrodn. Akad. Umiej.*, Seria B, 45, 123–131. Kraków. [in Polish]

Ziemiński, K., Wolska, A. (2014). Mineralogical and petrological characteristics of exotic schist cobbles from the Krosno Beds (Silesian Unit, Bieszczady Mts., south-east Poland). *Nafta-Gaz*, 10, 659–670.

Список використаних джерел

- Вялов, О.С., Гавура, С.П., Даныш, В.В., Лещух, Р.И., Пономарева, Л.Д., Романів, А.М., Циж, І.Т. (1981). История геологического развития Украинских Карпат. Киев: Наук. думка.

Габинет, М.П., Кульчицкий, Я.О., Матковский, О.И. (1976). Геология и полезные ископаемые Украинских Карпат. Ч. 1. Львов: Вища школа.

Гнилко, О.М. (2000). Хаотичні утворення південно-західної частини Кросненської зони – продукти зародження та розвитку Дуклянського покриву (Українські Карпати). *Геодинаміка*, 1(3), 65–74.

Гнилко, О.М. (2011). Принципи виділення, характерні особливості, типізація та походження олістостром і меланжів Українських Карпат. *Вісник Львів. ун-ту. Серія геологічна*, 25, 20–35.

Гнилко, О.М. (2012). Тектонічне районування Карпат у світлі терейнової тектоніки. Стаття 2. Флішові Карпати – давня акреційна призма. *Геодинаміка*, 1(12), 67–78.

Гнилко, О.М. (2016). Геологічна будова та еволюція Українських Карпат. *Автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.01*. Львів.

Грузман, А.Д., Смирнов С.Е. (1985). Олістостроми кросненської свити Українських Карпат. *Докл. АН УССР. Сер. Б*, 4, 18–21.

Даниш, В.В. (1973). Геологія західної частини південного схилу Українських Карпат. Київ: Наук. думка.

Кузовенко В.В. (Ред.) (2003). Державна геологічна карта України. Масштаб 1:200 000. Карпатська серія. Аркуш "Сніна". Київ: Державна геологічна служба.

Кульчицкий, Я.О. (1977). Олистолиды, олистостромы и другие подводно-оползневые явления во флише Восточных Карпат. В кн.: Кульчицкий Я.О., Матковский О.И. (Ред.) Геология и полезные ископаемые Украинских Карпат. Ч. 2, 44–54. Львов: Вища школа.

Линецкая, Л.В. (1963). Конгломераты мела и палеогена северного склона Карпат и их значение для палеогеографии. *Автореф. дис. ... канд. геол.-минералог. наук*. Львов.

Лозыняк, П.Ю., Темнюк, Ф.П. (1971). Глава 4. Геологическое строение Карпат. Стратиграфия. Кайнозойская группа. Палеогеновая система. Силезская зона. В кн.: Глушко В.В., Крутков С.С. (Ред.) Геологическое строение и горючие ископаемые Украинских Карпат, 150–154. Москва: Недра.

Федушак, М.Ю. (1962). Умови утворення екзотичних конгломератів воротищенської серії Передкарпаття. Київ: Вид-во АН УРСР.

Цар, М.М. (2018). Конгломерати з екзотичним матеріалом в Українських Карпатах – поширення, склад, ймовірний генезис. *Геодинаміка*, 1 (24), 40–50. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.040>

Bąk, K., Rubinkiewicz, J., Garecka, M., Machaniec, E., Dziubińska, B., (2001). Exotics-bearing layer in the Oligocene flysch of the Krosno Beds in the Fore-Dukla Zone (Silesian Nappe, Outer Carpathians), Poland. *Geologica Carpathica*, 52 (3), 159–171.

Cieszkowski, M., Golonka, J., Krobicki, M., Ślaczka, A., Oszczytko, N., Waśkowska, A., Wendorff M. (2009). The Northern Carpathians plate tectonic evolutionary stages and origin of olistoliths and olistostromes. *Geodynamica Acta*, 22 (1), 101–126. DOI: 10.3166/ga.22.101–126

Fossen, H. (2016). Structural Geology. Second ed. USA: Cambridge University Press.

Gawęda, A., Golonka, J., Waśkowska, A., Szopa, K., Chew, D., Starzec, K., Wieczorek, A. (2019). Neoproterozoic crystalline exotic clasts in the Polish Outer Carpathian flysch: remnants of the Proto-Carpathian continent? *International Journal of Earth Sciences*, 108, 1409–1427. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01713-x>

Golonka, J. (2011). Evolution of the Outer Carpathian Basins. In: M. Bąk, M. Kaminski and A. Waskowska (Eds.) Integrating Microfossil Records from the Oceans and Epicontinental Seas. *Grzybowski Foundation Special Publication*, 17, 3–14.

Golonka, J., Waśkowska, A., Ślaczka, A. (2019). The Western Outer Carpathians: Origin and evolution. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 170 (3–4), 229–254. DOI: 10.1127/zdgg/2019/0193

Hnylko, O., Hnylko, S., Heneralova, L., Tsar, M. (2021). An Oligocene olistostrome with exotic clasts in the Silesian Nappe (Outer Ukrainian Carpathians, Uzh River Basin). *Geological Quarterly*, 65 (4). DOI: <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1616>

Mochnacka, K., Tokarski, A. (1972). A new occurrence of exotic blocks in the Krosno Beds near Ustrzyki Górne (Bieszczady range, Polish Eastern Carpathians). *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 42 (2–3), 229–238.

Oszczypko, N. (2006). Late Jurassic-Miocene evolution of the Outer Carpathian fold-and-thrust belt and its foredeep basin (Western Carpathians, Poland). *Geological Quarterly*, 50 (1), 169–194.

Ślaczka, A. (1963). Warstwy krosnieńskie dolne z Roztok Dolnych (Polskie Karpaty Wschodnie). *Rocz. Pol. Tow. Geologicznego*, 33, 181–187.

Ślaczka, A. (1961). Geneza poziomu egzotycznego z Bukowca koło Przełęczu Użockiej (Polskie Karpaty Wschodnie). *Rocz. Pol. Tow. Geologicznego*, 31, 129–143.

Ślaczka, A., Golonka, J. (2006). Remarks on evolution of west and east Outer Carpathians and on the Bukowiec Ridge. *Proceedings of 17th Congress Carpathian-Balkan Geological Association* (M. Sudar, M. Ercegovac and A. Grubic (Eds.)), 558–561. Serbian Geological Society. Belgrade.

Ślaczka, A., Wieser, T. (1962). Łupki z egzotykami z warstw krosnieńskich w rejonie Baligródu. *Kwart. Geologiczny*, 6, 662–678.

Tokarski, A.K. (1975). Geologia i geomorfologia okolic Ustrzyk Górnych (Polskie Karpaty Wschodnie). *Studia Geologica Polonica*, 48, 7–90.

Vacek, M. (1881). Beiträge zur Kenntnis der mittelkarpatischen Sandsteinzone. *Jahrbuch der geol. k.k. Reichsanstalt*, 31, Wien, 191–208.

Wójcik, K. (1905). Dolny oligocen z Ryszkian pod Użkiem. *Rozprawy Akademii Umiejętności, wydziel. Matematyczno-Przyrodniczy*, Seria B, 45, 123–131. Kraków.

Ziemiański, K., Wolska, A. (2014). Mineralogical and petrological characteristics of exotic schist cobbles from the Krosno Beds (Silesian Unit, Bieszczady Mts., south-east Poland). *Nafta-Gaz*, 10, 659–670.

Надійшла до редколегії 17.09.21

М. Цар, пров. інж.,
E-mail: maritsar14@gmail.com,
Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України,
вул. Наукова, 3-а, Львів, 79060, Україна

УЛАМКИ ЕКЗОТИЧНИХ МЕТАМОРФІЧНИХ СЛАНЦІВ В ОЛІГОЦЕНОВИХ ВІДКЛАДАХ СІЛЕЗЬКОГО ПОКРИВУ (УКРАЇНСЬКІ КАРПАТИ)

Метою дослідження є аналіз петрографічного складу уламків екзотичних метаморфічних сланців в олігоценічних відкладах південно-західної частини Сілезького покриву Українських Карпат та реконструкція їх можливого джерела живлення. Методологія включає петрографічний, седиментологічний та порівняльно-геологічний методи.

Для досягнення цієї мети проведено польові дослідження в районі першої правої притоки потоку Гусний (с. Ужок, Великоберезнянський р-н, Закарпатська обл.) і виконано петрографічний аналіз відібраних зразків екзотичних метаморфічних сланців, які входять до складу олігоценічних уламкових відкладів.

Результати мікроскопічних досліджень показали, що екзотичні породи представлені слюдисто-кварцовим сланцем і гранат-мусковіт-біотит-плагіоклаз-кварцовим сланцем з незначним вмістом хлориту, карбонату та епідоту. Мінеральний склад та особливості структури/текстури дозволяють припустити, що ці гірські породи метаморфізовані в умовах зеленосланцевої та епідот-амфіболітової фацій. Подібні екзотичні уламки порід були зафіксовані польськими вченими в південно-східній частині Сілезького покриву Польських Карпат, де їхнє можливе джерело живлення пов'язують із палеохребтом Буковець, який був розташований між Дуклянським та Сілезьким басейнами Карпатського седиментаційного регіону.

Наукова новизна. Вперше описано петрографічний склад і текстурно-структурні особливості уламків екзотичних сланців, що входять до складу олігоценічних відкладів Сілезького покриву Українських Карпат (район с. Ужок, Українські Карпати). Зроблено висновки про схожість цих порід з екзотичними породами, які включені в олігоценічні відклади Сілезького покриву Польських Карпат, що може свідчити про єдине джерело живлення.

Ключові слова: екзотичні породи, метаморфічні сланці, Сілезький покрив, Українські Карпати.

UDC 553.493.68

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.03>

K. Poliakovska^{1,2}, PhD student,
E-mail: kateryna.poliakovska@gmail.com;
O. Ivanik¹, Prof.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
I. Annesley^{2,3}, Prof.,
E-mail: irvine.annesley@univ-lorraine.fr;
N. Guest⁴,
E-mail: guest.nic@gmail.com;
A. Otsuki^{2,5}, Prof.,
E-mail: akira.otsuki@univ-lorraine.fr;

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

²Université de Lorraine – École Nationale Supérieure de Géologie, Campus Brabois,
GeoRessources, Rue du Doyen Marcel Roubault, F-54000 Nancy, France;

³University of Saskatchewan, Department of Geological Sciences,
114 Science Place, Saskatoon, SK, S7N5E2, Canada;

⁴Appia Rare Earths & Uranium Corp., Suite 500, 2 Toronto Str., Toronto, ON, M5C 2B6, Canada;

⁵Luleå University of Technology, Waste Science & Technology, SE 971 87 Luleå, Sweden

IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF STRUCTURAL-TECTONIC FEATURES OF GEOLOGICAL TERRAINS USING LINEAMENT ANALYSIS: EXAMPLES OF GEOMODELLING FOR CANADIAN AND UKRAINIAN SHIELDS

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

Nowadays, rare earth elements (REEs), which belong to the group of rare metals, are considered worldwide to be strategic critical raw materials and are extremely important for the economic development of any country. Various methods and approaches are used for prospecting and exploration of deposits of these critical metals; among which the methods of 3D geological modeling are currently prioritized, which allow a comprehensive analysis of the structural features of potentially promising areas as well as individual deposits. One of the methods used for REE exploration is structural mapping combined with geological terrain analysis, including structural lineament analysis. The latter is considered an important geological tool for identifying the primary and secondary structural and tectonic features of our study areas of investigation.

The objectives of the present research work are: 1) to identify structural lineaments within two studied areas – the Alces Lake area (Northern Saskatchewan, Canadian Shield) and the Western Azov region (Azov block of the Ukrainian Shield) using automated and manual approaches, 2) to compare the results obtained for both areas, and 3) to discuss interpretation/conclusions over the overall suitability of the method for the exploration purposes. In the current research, we conducted the extraction and geospatial analysis of linear features and their tectonic interpretation. During the modeling process, remote sensing and geostatistical methods were used to analyze topographic, geological and geophysical data. As a result, the main structural lineament trends for the two studied areas were identified and structural-tectonic criteria for the formation and localization of deposits of rare earth elements were determined/proposed.

Keywords: geological modeling, spatial modelling, REEs, structural lineament analysis.

Introduction. During Greenfield and Brownfield exploration programs many geological, geophysical, and geochemical exploration methods are used in order to discover new metal deposits. Among these, geophysical methods (including the ground and airborne geophysical techniques) and remote sensing data are routinely used to detect and map the potential ore bodies. Geophysical and topographic data is collected, processed, and analyzed at different scales, thus it can facilitate making discoveries on a regional- to district- to deposit scale. Even though these geophysical methods cannot provide direct detection of REE mineralization, coupled with the 2D/3D modeling they can still give us necessary information on some of the geological/lithological controls, which may lead us to the identification of a structural pathway and/or geochemical trap of the given mineralization.

Geological modeling is a powerful tool for visualization of different geological systems and allows us to better understand a given prospective mineralized area. It can be useful at every stage of exploration of the given deposit and helps us develop efficient geo-metallurgical delineation plans for future exploitation. Such modeling approach that incorporates different types of data such as geophysical, geochemical, remote sensing data etc. is widely used in mineral exploration within a variety of geological and tectonic settings (Denton et al., 2019). When we combine and integrate various methods, we can get significant insights into a particular mineral system, which significantly enhances an exploration program for the REE deposits.

In our research, we utilized the lineament analysis method, whereby we mapped the structural lineament features (i.e. interpreted shear zones, fault zones) using both geophysical and topographic data. Such method is used a lot during exploration research (Kassou et al., 2012; Yeomans et al., 2019; Patra et al., 2013). The reason for that is that the identified lineament features have often a direct connection to such structural elements as faults, shear zones, folding patterns, and lithological boundaries. Thus, we attempted to decipher the surface/subsurface structures of the two selected areas using remote sensing tools and interpretations of geological features from potential field data. The extracted information was then integrated with and compared to the available tectonic and geological information from each area.

Objective of the study. The main objective of the research in this paper is to map the structural lineament features of the two areas by using automated and manual approaches of the lineament extraction, compare the results obtained for both areas and to make conclusions over the overall suitability of the method for the exploration purposes.

This paper is a part of a larger study (Poliakovska et al., 2019, 2020; Sykes & Annesley, 2017; Sykes et al., 2020) that is focused on the study of the Alces Lake area REE-Th-U mineralization (SK, Canada) and its comparison to a similar area within the West Azov block of the Ukrainian Shield. The Alces Lake area may represent the Abyssal pegmatite subclass (Černý & Ercit, 2005). This type of pegmatite deposit is rarely

© Poliakovska K., Ivanik O., Annesley I., Guest N., Otsuki A., 2022

related to a granite body (pluton) nearby and is often found within upper-amphibolite- to granulite-facies migmatitic host rocks. Alces Lake is ranked as the highest-grade REE occurrences in Canada (<http://www.appiaenergy.ca/>). The REEs are hosted in monazites within granitic to residual melt pegmatites, which are associated with biotite-rich (+/- sulfides) paragneisses (Bell, 2014; Normand, 2010, 2014). The second tested area, West Azov area of the eastern Ukrainian Shield, is considered a promising target area for REE exploration. Within the West Azov block deposits and occurrences of rare earth elements are associated with the formation of rare metal-rare earth granite pegmatites, confined to the Mesoarchean trough-like structures, but also with rare earth granites and rare earth metasediments, etc. The most favorable conditions for localization of the REE mineralization are observed to occur within areas with intensively deformed and folded gneissic rocks, that is the structural-metallogenic zones.

Geological Setting – Alces Lake. Alces Lake is located approximately 34 kilometers east of Uranium City, about 28 km north of the Athabasca Basin margin. Alces Lake property is located within the Beaverlodge Domain at the junction of the Beaverlodge, Train, Zemlak, and Ena Domains in the Rae Subprovince. The Beaverlodge and Train Domains are separated by the S. Louis Fault – a major regional structure striking ENE and dipping steeply SSE (Fig. 1). The Beaverlodge Domain is underlain by Archean meta-igneous gneisses and Paleoproterozoic meta-sedimentary/meta-igneous gneisses which were highly deformed, metamorphosed, and partially melted during Paleoproterozoic collisional and accretionary events (i.e. during the Arrowsmith (D1, D2), Taltson (D3), and Hudsonian orogenies) (Ashton *et al.*, 2009; Hoffman, 1988; Regis, 2021). As a result of those events, abundant granitic and pegmatitic sheets formed throughout the Beaverlodge Domain, in particular within the amphibolite- to granulite-facies Murmac Bay Group metasediments at different structural levels. Within the Beaverlodge Domain, the mineralization is closely associated spatially with the contact between Archean rocks and Paleoproterozoic supracrustal packages composed of quartzite, amphibolite, psammite, psammopelite, and pelite rocks of the Murmac Bay Group (Fig. 2) (Annesley *et al.*, 2019; Bethune *et al.*, 2013; Normand, 2010).

The Alces Lake REE area is a part of a regional refolded fold structure, within a synformal anticline. The mineralization is located on the eastern limb, close to the hinge of a south-plunging, truncated open fold (Normand,

2010; Normand, 2014). The REE mineralized system is composed of Proterozoic late-orogenic to metasomatic massive braided biotite schist, quartzofeldspathic pegmatite augen, and monazite accumulations. All the REEs are fully hosted within monazites and can be found in both the biotite schists and pegmatite augens (<http://www.appiaenergy.ca/>; Chandirgi-Martinez & Pan, 2018). The monazite mineralization occurs in different habits as isolated grains within 1 to 3 cm thin lenses, as isolated massive clusters up to m's thick, and as pervasive massive clusters of monazite in augenitic (boudinaged) masses along ductile to ductile/brittle to brittle structures.

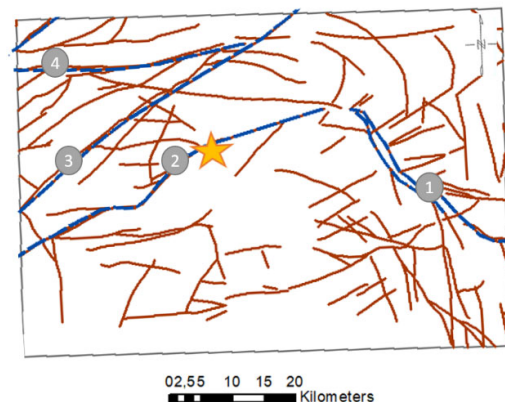


Fig. 1. Selected known faults and shear zones identified for the Alces Lake area within the Beaverlodge domain.

Star marks the location of the Alces Lake deposit.

The Beaverlodge domain is bounded to the north by the Oldman-Bulyea shear zone (1) – a >70 km-long thrust-sense structure, dipping SW and St. Louis fault (2) and to the west by the Black Bay fault zone (3) – a major Paleoproterozoic, NE-SW-trending crustal-scale fault zone. 4 – Tazin Lake Fault – separates the Ena and Zemlak domains

Lithological units on the Alces Lake property include:

- Archean granitic gneiss.
- Paleoproterozoic metasedimentary gneiss (pelitic-psammopelitic [+/-graphite], quartzite, amphibolite, pyroxenite, diatexite), and feldspathic gneiss.
- Paleoproterozoic syn- to late-anatectic pegmatites.
- Paleoproterozoic late-orogenic to metasomatic biotite schist, pegmatite augen and monazite accumulations (the REE mineralized system) (<http://www.appiaenergy.ca/>).

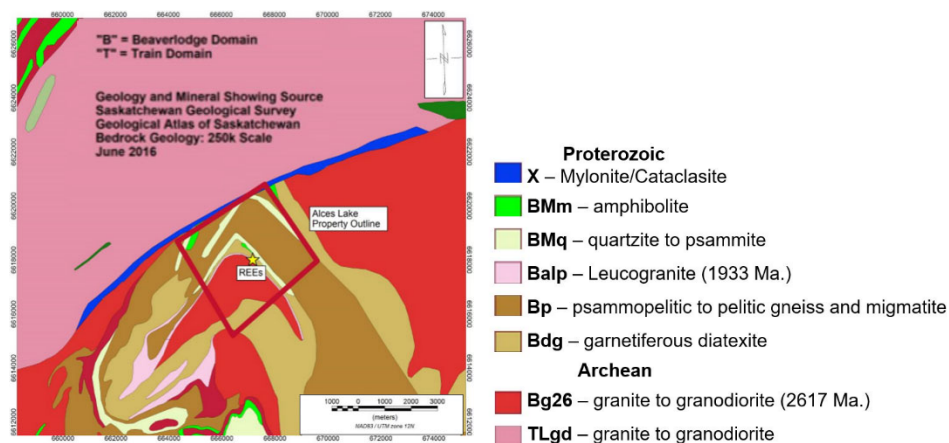


Fig. 2. Geological setting of Alces Lake in the Beaverlodge Domain (modified after Normand 2014 and the Saskatchewan Geological Atlas). Figure is courtesy of Appia Energy Corp. (2021). The property outline is that of the original main outcrop showings. The present property is much larger and its dimensions can be found on Appia's website

The authors opine that the mineralized pegmatites have been emplaced within/near the Archean/Paleoproterozoic transition zone under middle crustal P-T conditions and form polyphase anatectic pods/boudins/zones along/near this transition. Emplacement of the pegmatites is interpreted to be deep-seated, structurally controlled along ductile to ductile-brittle to brittle shear zones/faults associated spatially with regional polyphase fold structures (Poliakovska et al., 2021).

Geological Setting – West Azov area. The West Azov area is a part of the Azov block within the Ukrainian Shield (Fig. 3). The Ukrainian shield in general has been studied and described by many different scientists, however, there are still some ongoing debates concerning the smaller local areas and the genesis of some REE deposits (Sukach et al. 2021, Syomka et al., 2010).

Three main stages of tectonic evolution have been identified in this area: pre-platform (Archean), early platform (Proterozoic), and platform (Paleozoic and Mesocainozoic) stages (Claesson et al., 2006).

The Azov megablock underwent a powerful tectonic-magmatic activation in the Proterozoic, leading to the formation of subalkaline and alkaline massifs (granosyenites, syenites, gabbro-syenites, alkaline and nepheline syenites). The megablock is considered by many researchers as a fragment of the Archean granite-greenstone area / craton involved in collisional Paleoproterozoic metamorphism. A distinctive feature of the Azov megablock is a significant intensity and unevenness of metamorphism from epidote-amphibolite to granulite facies, widespread development of alkaline magmatite massifs (Pokalyuk et al., 2019). We studied the deposits in pegmatoid granites and quartz-microcline metasomatites, which were formed at the stage of early Proterozoic granitization of the Precambrian regions. Mineralization is usually found localized in metasomatically altered pegmatites, aplites and granites, forming a series of subparallel veins (Sukach et al., 2021).

One of the main interests is the Vovchansky tectonic block, which hosts the REE Dibrovo deposit. The Vovchansky

tectonic block is characterized by a multilevel folded-domed structure, mainly antiformal. The lower structural level is composed of Paleo-, Mesoarchean plagiogranitoids with xenoliths / inclusions of amphibolite and gneiss bodies. These rocks form mainly dome-shaped antiform structures. Rocks of the upper level overlie the Paleoproterozoic structural level with a clear angular unconformity.

The upper Archean-Proterozoic level, which fills the interdome synform structures, is represented by metamorphosed amphibolite-granulite facies rocks of volcanic and sedimentary genesis.

The Dibrovo synclinal structure is a 4 by 1.5 km synclinal fold with steeply dipping limbs. It is composed of supracrustal rocks metamorphosed under amphibolite facies conditions; locally granulite to epidote-amphibolite facies. The Dibrovo deposit is located within a complex tectonic junction at the intersection of the Devladiivska and diagonal fault zones with respective north-eastern and south-eastern structural trends. The ore bodies are represented by a system of lenticular veins/bodies of microclinized quartzites and dynamo-metomatically altered pegmatites, oriented subparallel with the strike of the host Paleoproterozoic metasedimentary rocks.

Mineralization at the Dibrovo deposit marks the unconformity surface between the Archaean (Archaean plagiogranitoid basement) and the Paleoproterozoic (metamorphosed sedimentary, volcanogenic-sedimentary complexes).

Rare earth, Th, and U are mostly found in monazite, but also in zircon, uraninite, and brannerite. In some large fragments of plagioclase-microcline granites in quartzites and their small intervals in the core, where the content of monazite reaches 15–18 %. The mineralization was probably formed as a result of the ultrametamorphic metasomatic processes that accompanied the intrusion of aplite pegmatoid granite bodies into the meta-terrigenous rocks and provoked remobilization, redistribution and enrichment of the primary mineralization.



Fig. 3. Known faults and shear zones identified for the Azov Block of the Ukrainian Shield.

Star marks the location of the Dibrovo deposit. Orikhovo-Pavlohradskaya Shear Zone – located between the Azov and Middle Dnieper megablocks (separated by deep faults: 1 – Orikhivsko-Pavlohradskiyi fault, 2 – Zakhidnopryazovskiyi fault, 3 – Pavlohradskiyi fault, 4 – Korsatskiy fault). The width of the zone decreases from south to north from 50 to 7 km. 5 – Tsentralnopryazovskiyi fault and 6 – Maloianisolskiy fault – zones of deep faults, that separate the Azov megablock into three blocks – West, Central and East

Input Data. A geological database was created with the following datasets:

1) *Surface topography:*

The surface topography was modeled using the SRTM data (Shuttle Radar Topography Mission – Spatial Resolution

30 meters), DEM data (Digital Elevation Model) and Landsat 8 (Date Acquired – 17.06.20, Spatial Resolution 30 meters) images.

2) *Geological maps, figures, cross-sections, and the database of known faults and shear zones within the two study areas:*

The reports, maps, figures and cross-sections from previous existing investigations of the areas were digitized; valuable information for the current research was extracted.

3) Geophysical data:

The data used in the current study for the Alces Lake area was retrieved from the Saskatchewan Geological Survey public domain database (district-scale data) and provided by the Appia Rare Earths & Uranium Corp. (Appia Rare..., n.d.). The geophysical datasets were provided by Appia Energy Corp and conducted by the MWH Geo-Surveys Ltd and Geotech Ltd in June 2019 and May 2016, respectively.

The geophysical data for the Ukrainian shield was collected from the public domains or retrieved from the geological reports (Pigulevskiy, 2012; Svistun and Pigulevskiy, 2021).

GeoModeling Methodology – Processing and Interpretation of Satellite imagery and Geophysical data.

To characterize the studied terranes, gravity, magnetic, and remote sensing data were analyzed. Geophysical methods are widely used in geology, especially during the exploration programs. They help mineral exploration geoscientists understand the geology of the subsurface and model the crustal blocks at different scales. High-resolution geophysical data enables a detailed mapping of the lithological units and geological structures of an area of investigation at a district-to local- to deposit-scale, which can lead to better results in Greenfield to Brownfield exploration programs (Denton et al., 2020). Nowadays, such potential field data are utilized to detect among other the iron oxide–copper–gold mineralization, massive sulfides, and structural features such as faults and foldings and in general are widely used for geologic mapping (Patra et al., 2013). In this study, we utilized gravity and magnetic survey data and their derivatives. Data was imported into the Geosoft Oasis montaj software

package for further processing. Based on study of the 1st vertical derivative, tilt derivative, and total horizontal gradient images we were able to decipher detailed structural fabric of both areas (the magnetic intensity values were first reduced to magnetic pole before applying other filters). Such derivatives are great tools for delineating both deep as well as shallow structures, depending on the enhancement filter used.

Satellite images and aerial photographs are also extremely useful for structural and lithological discrimination (Patra et al., 2013). In order to extract the lineaments several steps are required, starting with the pre-processing of these images, followed by the lineament extraction and further spatial analysis.

Image filtering and enhancements are utilized during the image processing stages, because those operations are able to highlight the edges or other linear features, at the same time improving the accuracy (Ahmadi & Pekkan, 2021). Thus, various data enhancement techniques were used to selectively improve the signal of interest and allowed geological structures to be seen and mapped considerably more detailed than using the 'raw' data. Different filters and enhancements were applied to the 'raw' images (Fig. 4) and data, which at the end allowed us to perform the lineament feature analysis using both manual and automatic approaches.

The following image enhancements were used for the geophysical grids: RTP, 1VD, Tilt Derivative, Total Horizontal Gradient etc. (Fig. 5). As for the satellite images, there were utilized various image processing filters, such as Gradient S, N, W, E, NE, NW, Laplacian filters etc. The analysis was performed using the ArcGIS 10.4 (Image Analysis tab) and Geosoft Oasis Montaj (2D filtering tools) software packages.

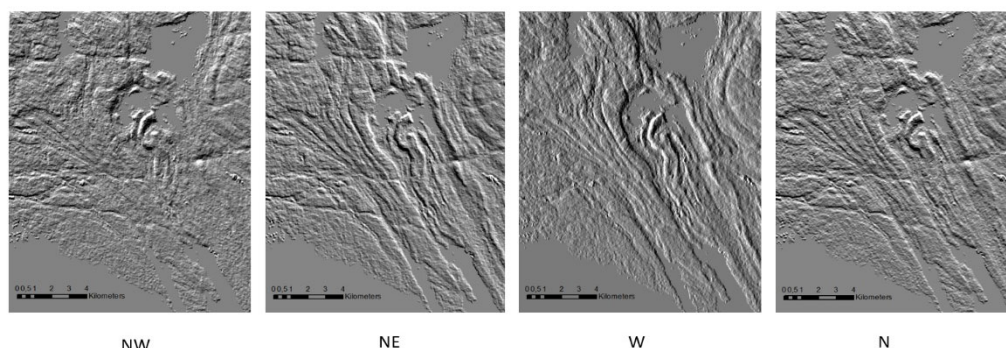


Fig. 4. Example of the remote sensing image processing and enhancement – Gradient NE, NW, W, E filters applied to the DEM image (Beaverlodge domain, Northern Saskatchewan, Canada)

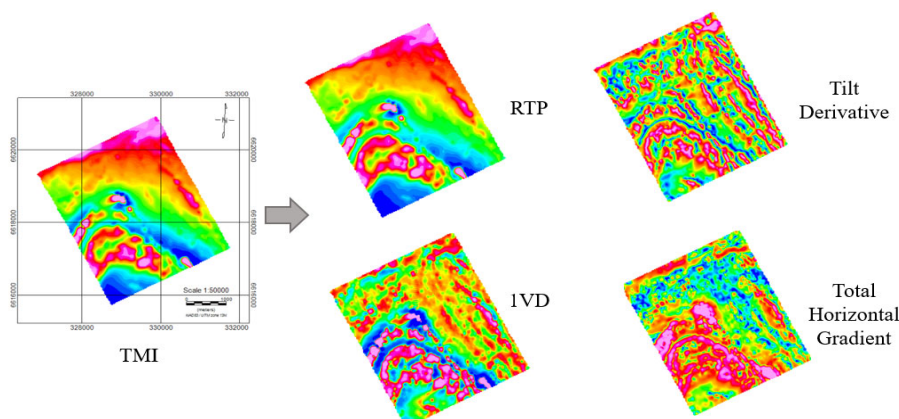


Fig. 5. Example of the geophysical image processing and enhancement – RTP, 1VD, Tilt Derivative, Total Horizontal Gradient filters applied to the TMI image (Beaverlodge domain, Northern Saskatchewan, Canada)

Lineament analysis. Lineaments (linear features) are considered as curvilinear to straight landforms that are widely distributed across the Earth's surface. They can be controlled by both geological structures (shear zones, lithological boundaries, faults, discontinuities, folds, etc.) and man-made or geomorphological features. The spatial statistical information such as density, length, and orientation of lineaments reflect rock mass fracture patterns and provides valuable information related to hazard assessment, geological structures, tectonics, and natural resource availability. In the current research we carried out lineament analysis using both manual visual identification method and automatic extraction approach with the suitable software. Manual lineament extraction is performed by visual interpretation of human operators and is well suited for spatial assessment; the extraction is conducted using an image enhancement process e.g., directional filtering, band ratio, transformation, visual interpretation, and manual digitization of the lineaments. On the other hand, automated lineament extraction is performed using computer-assisted software. The automated processing includes enhancement, filtering, edge detection, and finally, lineament extraction. The identification of lineaments using the automatic technique is considered more efficient and much faster method than the manual one. However, automatically extracted lineaments tend to contain lineaments derived from other sources besides geological structures, such as railway, power, and fence lines (Radaideh *et al.*, 2016).

One of the tasks of this study was to establish a suitable methodology for automatic/digital and manual lineament analysis of potential field geophysical data sets combined

with the aerial photography data for further structural interpretation of two selected study areas – i.e., within the Canadian (Alces Lake area) and Ukrainian (West Azov area) Shields. Consequently, we have tested several methods, compared the obtained results from both manual and automated approaches between each other and with the known geological structures.

During the analysis we utilized mainly two types of data to extract the lineaments in both manual and automated approaches – satellite images or aerial photographs and geophysical gravity and magnetic survey data. A number of geomodelling software packages were used for the analysis: Geosoft Oasis Montaj, ArcGIS, and Geoscience ANALYST Pro. Remote sensing and GIS techniques were applied during the process of analyzing and interpreting the geophysical and topography data.

The workflow (Fig. 6) used in this study is composed of four main steps:

- 1) Selection of the most suitable data for analysis, – e.g. SRTM/DEM/Landsat images, various geophysical data.
- 2) Potential field geophysical data and aerial photography data processing and enhancements.
- 3) Lineament extraction by using the manual and automated approaches and their further comparison.
- 4) Comparison of the final map with available geological and tectonic maps of the area and Geospatial analysis (density, direction, intersection length, and orientation analysis) using the ArcGIS software tools. This way it was possible to evaluate the results obtained with both methods.

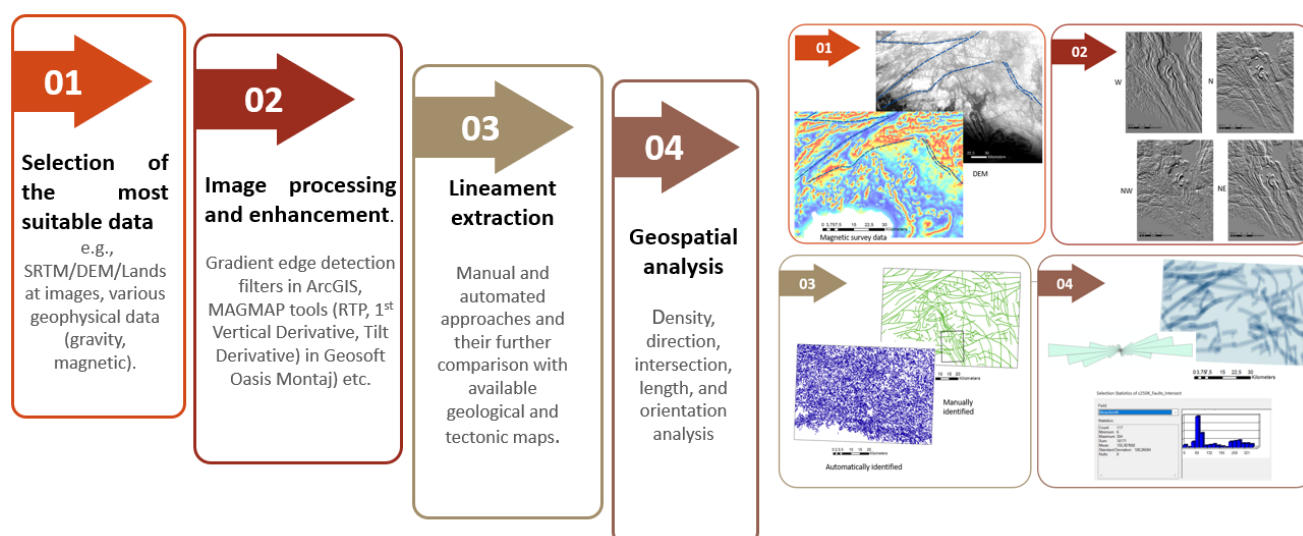


Fig. 6. Proposed lineament analysis workflow

Results and Discussion. Today, rare earth elements, members of the rare metals group, are viewed worldwide as strategic critical raw materials, and are extremely important for the economic development of any country. These elements include the entire range of lanthanides, as well as yttrium and scandium. They are used in the production of high-power magnets, catalysts, high-precision optics, and electronics, among other products.

The use and need for these elements will continue to grow in the future, as they play a key role in achieving the goals of sustainable development. Therefore, discovering deposits of these critical raw materials come to the forefront

of today's exploration challenges, where understanding the mineral systems of the rare metals is an essential part of any successful exploration program (Verplanck, Hitzman, 2016).

In this paper we presented the lineament analysis and image processing techniques to help generate maps that would show/highlight the areas of geological structural complexity derived from geophysical data and various satellite images. Exploration programs often rely on and are based on combined geological/geophysical/geochemical information, and our resulting lineament analysis maps could provide a significant contribution to the exploration decision-making process. Thus, the preliminary lineament analysis was conducted for the two

study areas – Alces Lake area and West Azov area using both topographic (SRTM, DEM, Landsat 8) and geophysical data (derivatives of magnetic and gravity survey data). This was carried out by combining various image analysis processing and enhancement techniques.

Mineral deposits of both study areas – Alces Lake within the Beaverlodge Domain of northern Saskatchewan (Canada) and West Azov region within the Azov Block in Ukraine have a complex genesis, related to the Paleoproterozoic tectonic events that highly deformed and metamorphosed the primarily meta-sedimentary (and meta-igneous) Archean/Paleoproterozoic rocks (table 1). As a result, abundant granitic and pegmatitic

sheets were formed throughout the Beaverlodge Domain and the Azov Block. Mineralization of both Precambrian areas occurs near the tectonized unconformity surface between the Archean basement rocks and the Paleoproterozoic metamorphosed meta-sedimentary/meta-igneous rocks. It is suggested by the authors that the mineralization could have formed as a result of crustal thickening, associated with mafic magma underplating (evidence from abundant mafic dykes/sheets in the Alces Lake area), lower crustal melting, and subsequent decompression and partial melt migration along reactivated shear/fault zones (Poliakovska et al., 2021).

Table 1

Comparison between the Alces Lake and Dibrovo REE-Th-U mineralization

Comparison parameter	Alces Lake (Canadian Shield)	Dibrovo (Ukrainian Shield)
Belonging to the tectonic-metamorphic type of Precambrian blocks of the earth's crust (Ukrainian classification)		Granulite-greenstone type or plagiogranite-greenstone type
Degree of regional metamorphism of host rocks	Amphibolite, granulite	Mainly amphibolite, locally granulite and epidote-amphibolite
Tectonic-stratigraphic control	It is confined to the tectonic zone of contact between Archean and Paleoproterozoic complexes, mainly within Paleoproterozoic deposits.	It is confined to the zone of contact between the Archean plagiogranitoid basement and the Paleoproterozoic folded cover. Localization in Paleoproterozoic metasedimentary complexes near the zone of contact with the Archean basement.
Intensity of dynamometamorphism	High	High
Intensity of metasomatism	High	High
Characteristics of metasomatism	Alkaline (potassium-sodium)	Alkaline (potassium-sodium)
Ore bodies	Pegmatoids	Quartzites (metaterrigenous or secondary), Pegmatoids
Host rocks	Paleoproterozoic gneisses, schists	Paleoproterozoic quartzites and high alumina schists
The main ore mineral	Monazite	Monazite
Monazite contents in ore bodies	Up to 85 modal %	Up to 18 modal %
Age of mineralization	1950 to 1750 Ma ????	Productive TR-U-Th mineralization was formed in the Paleoproterozoic stage 1.9–2.2 billion years ago. It was generated by hydrothermal-metasomatic processes that accompanied the penetration of the final magmatic phases, probably of the Saltychan complex, and were represented by granites of the Dibrovo type

In our research study, both automatic and manual methods (Fig. 7) were able to correctly identify some geological structures within the areas of investigation with different degrees of reliability and accuracy. For the manually identified lineament features within the Alces Lake area, the percentage of lineaments that represent the known geological structure out of all the manually identified linear features was 36,9 %, whereas this number for the automatically identified linear features for the same area was 19,8 % (Note for both analyses, a tolerance limit of 250 m was applied).

As for the orientation analysis, both methods could successfully identify the main trends. The main structural elements and associate mineralization are related mainly to the following lineament features: 1) NNW-SSE and E-W (340 and 060 to 090) – oriented structural elements within the Alces Lake area and 2) NW-SE, E-W and NNE (340, 090 and 045) – structural elements within the West Azov area, which can be tracked at different degrees of uncertainty using lineament analysis.

However, it is recommended by authors to utilize the combined manual and automated approach, to achieve the most reliable results. The output is also highly dependent on the area of study. Within the Beaverlodge Domain, the overall close similarity between the lineament trends, present-day drainage system, and subsurface features is a reflection of a highly glaciated terrain with abundant outcrops separated by a very thin glacial cover; suggesting that the development of the present landforms is highly controlled by subsurface

basement structures and their reactivation during glacial rebound. This is in sharp contrast to the ones within the West Azov area of the Ukrainian Shield, in which less than 10 % of the identified lineament features corresponded to the deep subsurface structural elements.

The spatial statistical analysis, especially the density one can serve as a good proxy for the structural complexity of the areas, which is an important targeting parameter for mineral exploration. This way we can identify major intersection zones of possible fault dilation with associated fluid and heat flow, where structural geochemical traps are located for mineralizing fluids (melts) and thus providing some new insight to the REE-Th-U mineral systems of the two shield areas. The resultant interpretive maps can show these regions of greatest structural complexity, which then can be used to infer potential targets and to improve the manual or GIS-based perspective (prospectivity) analysis.

Conclusions. In this study we show the results of combined remote sensing and GIS methods in order to attempt to interpret the complex Precambrian shield areas. The various image processing techniques coupled with the lineament extraction methods allow us to study the large areas. They can be an essential integrated component for understanding the tectonics of the area of interest. The lineament analysis has proven its effectiveness in many branches of geological studies and is widely used during mineral and petroleum exploration programs, groundwater surveys, and natural hazard assessment studies.

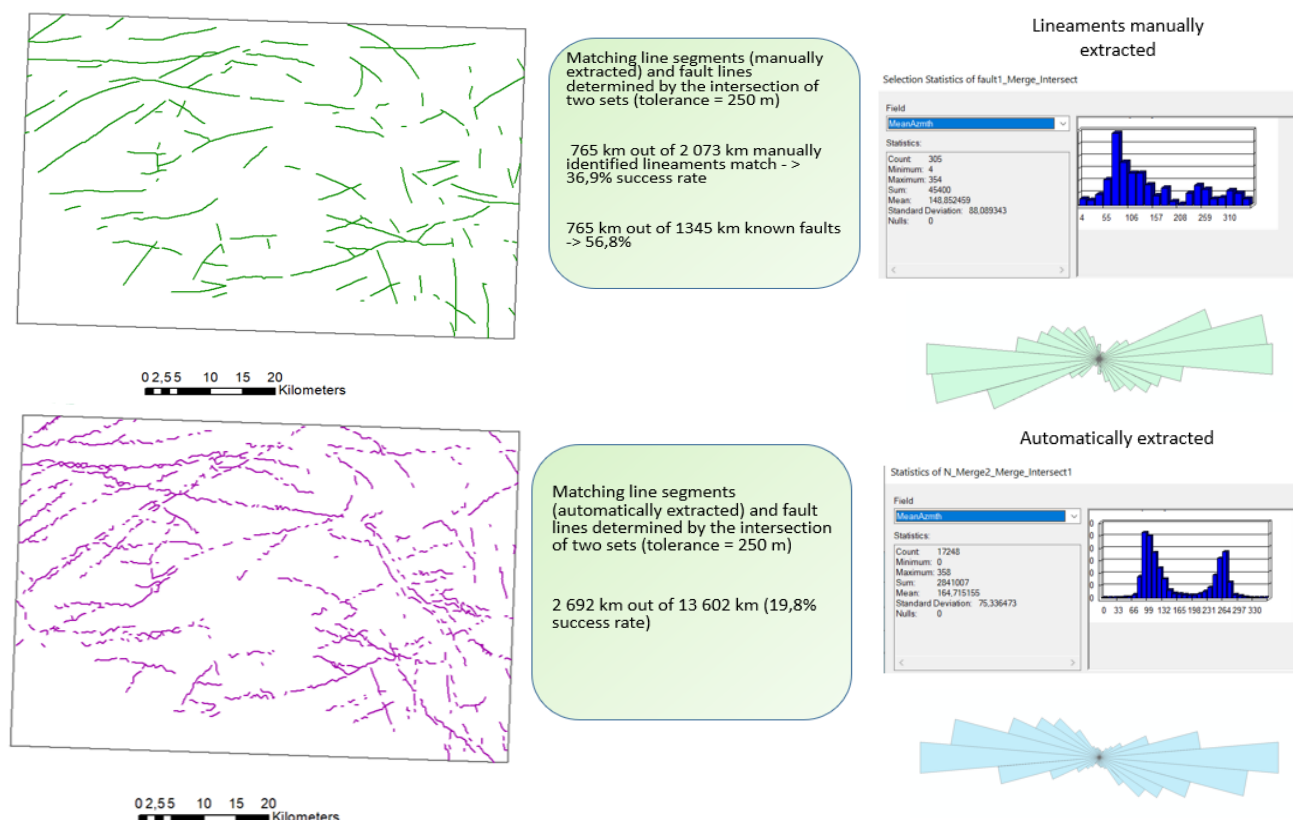


Fig. 7. Manual (top) and automated (bottom) approach modeling results

This paper shows the results of the analysis of two study areas, within the Canadian and Ukrainian Shields, using the automated and manual lineament extraction approaches. We utilized various enhanced and filtered potential field and remote sensing data. Consequently, we were able to identify the prevailing trends in the distribution of structural elements within both study areas. Those are respectively: 1) NNW-SSE (~340) and E-W (060–090) – oriented structural elements within the Alces Lake area and 2) NW-SE, E-W and NNE (340, 090 and 045) – ones within the West Azov area. However, since the geological structures are very much less exposed within the West Azov area (as a result of much thicker cover) the method described in this paper couldn't reveal all of them. Thus, it is concluded that the development of the present-day landscape and drainage systems within the Alces Lake area, in contrast to the West Azov area, was highly controlled or influenced by the outcropping and subsurface geological structures. Therefore, the lineament analysis method can with different levels of accuracy, depending on the characteristics of the studied terrain, give us new insights into the host mineral system and thus facilitate future discoveries.

Acknowledgements. The authors acknowledge the permission to publish by Appia Rare Earths & Uranium Corp. and also would like to thank the Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine) and the Université de Lorraine (Nancy, France).

References

- Ahmadi, H.; Pekkan, E. (2021). Fault-Based Geological Lineaments Extraction Using Remote Sensing and GIS—A Review. *Geosciences*, 11, 183. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050183>
- Annesley, I.R., Poliakovska, K., Sykes, J., Pandur, K. (2019) The Geology and Mineralogy of High-Grade Rare Earth Element (REE-Th-U) Mineralization at Alces Lake, Saskatchewan (Canada). *LIFE WITH ORE*

DEPOSITS ON EARTH, PROCEEDINGS OF THE 15TH SGA BIENNIAL MEETING, 2019, Glasgow, Scotland, 1–4, 1732–1735.

Appia Rare Earths & Uranium Corp. (n.d.). Retrieved on May 2022 from <https://www.appiareu.com/>

Ashton, K.E., Hartlaub, R.P., Heaman, L.M., Morelli, R.M., Card, C.D., Bethune, K., Hunter, R.C. (2009). Post-Taltson sedimentary and intrusive history of the southern Rae Province along the northern margin of the Athabasca Basin, Western Canadian Shield. *Precambrian Research*, 175, 1–4, 16–34.

Bethune, K.M., Berman, R.G., Rayner, N., Ashton, K.E. (2013). Structural, petrological and U–Pb SHRIMP geochronological study of the western Beaverlodge domain: Implications for crustal architecture, multi-stage orogenesis and the extent of the Taltson orogen in the SW Rae craton, Canadian Shield. *Precambrian Research*, 232, 89–118.

Černý, P., Ercit, T.S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *Can. Mineral.*, 43, 2005–2026.

Chandirji-Martinez, K., Pan, Y. (2018). Engage 2018 Project report: Mineralogy of the Wilson and Ivan zones, Alces Lake, Saskatchewan.

Claesson, S., Bibikova, E., Bogdanova, S., Skobelev, V. (2006). Archaean terranes, Palaeoproterozoic reworking and accretion in the Ukrainian Shield, East European Craton. *Geological Society, London, Memoirs*, 32, 645–654. 10.1144/GSL.MEM.2006.32.01.38.

Hoffman, P.F. (1988). United plates of America, the birth of a craton: Early Proterozoic assembly and growth of Laurentia. *Earth Planet. Sci., Ann. Rev.*, 16, 543–603.

Kassou, A., Essahlaoui, A., Aissa, M.A. (2012). Extraction of Structural Lineaments from Satellite Images Landsat 7 ETM+ of Tighza Mining District (Central Morocco). *Research Journal of Earth Sciences*, 4 (2), 44–48. DOI: 10.5829/idosi.rjes.2012.4.2.1110

Normand, C. (2014). Rare Earths in Saskatchewan: Mineralization types, settings, and distributions. *Saskatchewan Ministry of the Economy, Sask. Geological Survey, Rep.* 264.

Patra, I., Chaturvedi, A.K., Srivastava, P.K. et al. (2013). Integrated interpretation of satellite imagery, aeromagnetic, aeroradiometric and ground exploration data-sets to delineate favorable target zones for unconformity related uranium mineralization, Khariar basin, Central India. *J. Geol. Soc. India*, 81, 299–308. <https://doi.org/10.1007/s12594-013-0041-7>

Pigulevskiy, P.I. (2012). About the results of the magnetotelluric sounding of central part of the Srednepidneprovsky Megablock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 20–26.

Pokalyuk, V., Verkhovtsev, V., Mikhaylichenko, A., Mihalchenko, I., Zhyliak, E. (2019). Dibrovskoe uranium-triprur-rare-earth ore occurrence of the Ukrainian shield (litho-stratigraphic criteria of the genesis and localization of ore bodies). *Geochemistry of Technogenesis*, 1(2019) 57–72. [in Russian]

- Poliakovska, K., Annesley, I.R., Ivanik, O., Sykes, J., Guest, N., Otsuki, A. (2021). Geological setting, petrology, and 3D geochemical modeling of REE-Th-U mineralization in the Alces Lake area, Northern Saskatchewan, Canada. *Proceedings of the RING Meeting 2021, September 2021, Vandoeuvre-les-Nancy, France*, 216–227.
- Poliakovska, K., Annesley, I.R., Sykes, J., Pandur, K. (2019). 3D geomodeling of the Alces Lake rare earth element project (Saskatchewan, Canada): New insights to targeting mineralization. *Proceedings of the Visual3D conference 2019 – Visualization of 3D/4D models in geosciences, exploration and mining, 1–2 October 2019, Uppsala, Sweden*, 28.
- Poliakovska, K., Annesley, I.R., Sykes, J., Pandur, K. (2020). Detailed 2D/3D Geomodeling of the Alces Lake Rare Earth Element Project (Saskatchewan, Canada). *Proceedings of the RING Meeting 2020, 8–11 September 2020, Vandoeuvre-les-Nancy, France*, 1–8.
- Regis, D., Pehrsson, S., Martel, E., Thiessen, E., Peterson, T., Kellett, D. (2021). Post-1.9 Ga evolution of the south Rae craton (Northwest Territories, Canada): A Paleoproterozoic orogenic collapse system. *Precambrian Research*, 355.
- Sukach, V., Shpylychak, V., Hrinchenko, O., Bondarenko, S., Isakov, L., Somka, V. (2021). Dibrova deposit – the typical complex REE-U-Th mineralization of Azov metallogenic province of the Ukrainian shield. *Mineral resources of Ukraine*, 1, 18–31. [in Ukrainian]
- Svistun, V., Pigulevskiy, P. (2021). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine. *20th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 11–13 May 2021, Vol. 2021, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521132>.
- Sykes, J., Annesley, I.R. (2017). New Discoveries and Geological Perspectives for High-Grade Rare Earth Element Mineralization on the Alces Lake Property, Northern Saskatchewan. *Saskatchewan Geological Survey, Open House 2017 Abstract Volume, Miscellaneous Report 2017-3*, 33.
- Sykes, J., Annesley, I.R., Poliakovska, K. (2020). The Role of Deep-Seated and Multiple Structural Controls on the Emplacement of High Concentration of Monazite, Alces Lake Property, Northern Saskatchewan, Canada. *Proceedings of the Virtual GeoConvention 2020, 21–23 September 2020*.
- Symka, V.A., Ponomarenko, A.N., Bondarenko, S.N., Donskoy, N.A., Shumlyansky, L.V., Melnikova, E.E., Symka, L.V. (2010). Dibrovskoe deposit of rare-earth-thorium-uranium ores in Azov Domain of the Ukrainian Shield. *Geochemistry and Ore Formation*, 28, 48–76. [in Russian]
- Van Gosen, B.S., Verplanck, P.L., Seal, R.R. II, Long, K.R., Gambogi, J. (2017). Rare-earth elements. Chap. 0 of Critical mineral resources of the United States— Economic and environmental geology and prospects for future supply. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. 01–031. <https://doi.org/10.3133/pp18020>.
- Verplanck, P.L., Hitzman, M.W. (Eds.). (2016). Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. Littleton, CO: Society of Economic Geologists. Reviews in economic geology, v. 18. <https://doi.org/10.5382/REV.18>
- Yeomans, C.M., Middleton, M., Shail, R.K., Grebby, S., Lusty, P.A.J. (2019). Integrated Object-Based Image Analysis for semi-automated geological lineament detection in southwest England. *Computers & Geosciences*, 123, 137–148. ISSN 0098–3004. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.11.005>.
- Список використаних джерел**
- Поклюк, В.В., Верховцев, В.Г., Михайличенко, А.Н., Михальченко, И.И., Жилияк, Е.Д. (2019). Дибровское уран-торий-редкоземельное рудопроявление Украинского щита (литолого-стратиграфические критерии генезиса и локализации рудных тел). *Геохимия техногенезу*, 1(2019), 57–72.
- Семка, В.А., Пономаренко, А.Н., Бондаренко, С.Н., Донской, Н.А., Шумлянський, Л.В., Мельникова, Е.Е., Семка, Л.В. (2010). Дибровское редкоземельно-уран-ториевое месторождение в Приазовском мегаблоке Украинского щита. *Геохимия та рудоутворення*, 28, 48–76.
- Сукач, В.В., Шпильчак, В.О., Гринченко, О.В., Бондаренко, С.М., Ісаков, Л.В., Сьомка, В.О. (2021). Дібровське родовище – типовий представник комплексного Tr-U-Th зруденіння Приазовської металогенічної області Українського щита. *Мінеральні ресурси України*, 1, 18–31.
- Ahmadi, H.; Pekkan, E. (2021). Fault-Based Geological Lineaments Extraction Using Remote Sensing and GIS—A Review. *Geosciences*, 11, 183. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050183>
- Annesley, I.R., Poliakovska, K., Sykes, J., Pandur, K. (2019) The Geology and Mineralogy of High-Grade Rare Earth Element (REE-Th-U) Mineralization at Alces Lake, Saskatchewan (Canada). *LIFE WITH ORE DEPOSITS ON EARTH, PROCEEDINGS OF THE 15TH SGA BIENNIAL MEETING, 2019, Glasgow, Scotland*, 1–4, 1732–1735.
- Appia Rare Earths & Uranium Corp. (n.d.). Отримано в травні 2022 з <https://www.appiareu.com/>
- Ashton, K.E., Hartlaub, R.P., Heaman, L.M., Morelli, R.M., Card, C.D., Bethune, K., Hunter, R.C. (2009). Post-Taltson sedimentary and intrusive history of the southern Rae Province along the northern margin of the Athabasca Basin, Western Canadian Shield. *Precambrian Research*, 175, 1–4, 16–34.
- Bethune, K.M., Berman, R.G., Rayner, N., Ashton, K.E. (2013). Structural, petrological and U–Pb SHRIMP geochronological study of the western Beaverlodge domain: Implications for crustal architecture, multi-stage orogenesis and the extent of the Taltson orogen in the SW Rae craton, Canadian Shield. *Precambrian Research*, 232, 89–118.
- Černý, P., Ercit, T.S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *Can. Mineral.*, 43, 2005–2026.
- Chandirji-Martinez, K., Pan, Y. (2018). Engage 2018 Project report: Mineralogy of the Wilson and Ivan zones, Alces Lake, Saskatchewan.
- Claesson, S., Bibikova, E., Bogdanova, S., Skobelev, V. (2006). Archean terranes, Palaeoproterozoic reworking and accretion in the Ukrainian Shield, East European Craton. *Geological Society, London, Memoirs*, 32, 645–654. 10.1144/GSL.MEM.2006.32.01.38.
- Hoffman, P.F. (1988). United plates of America, the birth of a craton: Early Proterozoic assembly and growth of Laurentia. *Earth Planet. Sci., Ann. Rev.*, 16, 543–603.
- Kassou, A., Essahlaoui, A., Aissa, M.A. (2012). Extraction of Structural Lineaments from Satellite Images Landsat 7 ETM+ of Tighza Mining District (Central Morocco). *Research Journal of Earth Sciences*, 4 (2), 44–48. DOI: 10.5829/idosi.rjes.2012.4.2.1110
- Normand, C. (2014). Rare Earths in Saskatchewan: Mineralization types, settings, and distributions. *Saskatchewan Ministry of the Economy, Sask. Geological Survey, Rep. 264*.
- Patra, I., Chaturvedi, A.K., Srivastava, P.K. et al. (2013). Integrated interpretation of satellite imagery, aeromagnetic, aeroradiometric and ground exploration data-sets to delineate favorable target zones for unconformity related uranium mineralization, Khariar basin, Central India. *J. Geol. Soc. India*, 81, 299–308. <https://doi.org/10.1007/s12594-013-0041-7>
- Pigulevskiy, P.I. (2012). About the results of the magnetotelluric sounding of central part of the Srednepidneprovsky Megablock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 20–26.
- Poliakovska, K., Annesley, I.R., Ivanik, O., Sykes, J., Guest, N., Otsuki, A. (2021). Geological setting, petrology, and 3D geochemical modeling of REE-Th-U mineralization in the Alces Lake area, Northern Saskatchewan, Canada. *Proceedings of the RING Meeting 2021, September 2021, Vandoeuvre-les-Nancy, France*, 216–227.
- Poliakovska, K., Annesley, I.R., Sykes, J., Pandur, K. (2019). 3D geomodeling of the Alces Lake rare earth element project (Saskatchewan, Canada): New insights to targeting mineralization. *Proceedings of the Visual3D conference 2019 – Visualization of 3D/4D models in geosciences, exploration and mining, 1–2 October 2019, Uppsala, Sweden*, 28.
- Poliakovska, K., Annesley, I.R., Sykes, J., Pandur, K. (2020). Detailed 2D/3D Geomodeling of the Alces Lake Rare Earth Element Project (Saskatchewan, Canada). *Proceedings of the RING Meeting 2020, 8–11 September 2020, Vandoeuvre-les-Nancy, France*, 1–8.
- Regis, D., Pehrsson, S., Martel, E., Thiessen, E., Peterson, T., Kellett, D. (2021). Post-1.9 Ga evolution of the south Rae craton (Northwest Territories, Canada): A Paleoproterozoic orogenic collapse system. *Precambrian Research*, 355.
- Svistun, V., Pigulevskiy, P. (2021). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine. *20th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 11–13 May 2021, Vol. 2021, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521132>.
- Sykes, J., Annesley, I.R. (2017). New Discoveries and Geological Perspectives for High-Grade Rare Earth Element Mineralization on the Alces Lake Property, Northern Saskatchewan. *Saskatchewan Geological Survey, Open House 2017 Abstract Volume, Miscellaneous Report 2017-3*, 33.
- Sykes, J., Annesley, I.R., Poliakovska, K. (2020). The Role of Deep-Seated and Multiple Structural Controls on the Emplacement of High Concentration of Monazite, Alces Lake Property, Northern Saskatchewan, Canada. *Proceedings of the Virtual GeoConvention 2020, 21–23 September 2020*.
- Van Gosen, B.S., Verplanck, P.L., Seal, R.R. II, Long, K.R., Gambogi, J. (2017). Rare-earth elements. Chap. 0 of Critical mineral resources of the United States— Economic and environmental geology and prospects for future supply. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. 01–031. <https://doi.org/10.3133/pp18020>.
- Verplanck, P.L., Hitzman, M.W. (Eds.). (2016). Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. Littleton, CO: Society of Economic Geologists. Reviews in economic geology, v. 18. <https://doi.org/10.5382/REV.18>
- Yeomans, C.M., Middleton, M., Shail, R.K., Grebby, S., Lusty, P.A.J. (2019). Integrated Object-Based Image Analysis for semi-automated geological lineament detection in southwest England. *Computers & Geosciences*, 123, 137–148. ISSN 0098–3004. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.11.005>.

Надійшла до редколегії 18.03.22

К. Поляковська^{1,2}, асп.,
E-mail: katernya.poliakovska@gmail.com;
О. Іванік¹, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
І. Аннеслі^{2,3}, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: irvine.annesley@univ-lorraine.fr;
Н. Гест⁴,
E-mail: guest.nic@gmail.com;
А. Оцукі^{2,5}, проф.,
E-mail: akira.otsuki@univ-lorraine.fr;

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

Інститут геології, вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна;

²Університет Нансі, Вища національна школа геології, кампус Брабуа, GeoRessources,
вул. дю Дюен Марсель Рубо, F-54000 Нансі, Франція;

³Університет Саскачевану, Факультет геологічних наук, Саянс Плейс, 114, Саскатун, СК, S7N5E2, Канада;

⁴Appia Rare Earths & Uranium Corp., Suite 500 – вул. Торонто, 2, Торонто, ON, M5C 2B6, Канада;

⁵Технологічний університет Лулео, Поводження з відходами і технології, SE 971 87 Лулео, Швеція

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕРИТОРІЇ НА ОСНОВІ ЛІНЕАМЕНТНОГО АНАЛІЗУ: ПРИКЛАДИ ГЕОМОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ КАНАДСЬКОГО ТА УКРАЇНСЬКОГО ЩИТІВ

На сьогоднішній день рідкісноземельні елементи, що входять до групи рідкісних металів, розглядаються у світі як стратегічна критична сировина і є надзвичайно важливими для економічного розвитку будь-якої країни. Для пошуків та розвідки родовищ цих елементів використовуються різні методи та підходи, серед яких пріоритетне значення мають методи геологічного моделювання, які дозволяють комплексно проаналізувати особливості будови як потенційно перспективних територій, так і окремих родовищ. Одним з методів геомодельовання, що використовуються для пошуків і розвідки родовищ рідкісноземельних елементів, є геолого-структурне картування та лінеаментний аналіз. Це важливі геологічні інструменти для виявлення структурно-тектонічних особливостей території досліджень.

Мета пропонованої роботи – виявити лінеаменти в межах двох досліджених територій – району Альсез Лейк (Північний Саскачеван, Канадський щит) і Західного Приазов'я (Азовський блок Українського щита) – з використанням автоматизованого і ручного підходів, порівняти отримані результати і надати рекомендації щодо можливостей використання цього методу як складової пошуків і розвідки родовищ рідкісноземельних елементів. У цьому дослідженні було виконано ідентифікацію та геопросторовий аналіз лінеаментів із такою тектонічною інтерпретацією. У процесі моделювання для аналізу топографічних і геолого-геофізичних даних було використано методи дистанційного зондування та геостатистики. У результаті було виявлено основні структурні тренди для двох досліджуваних районів та визначено структурно-тектонічні критерії формування і локалізації родовищ рідкісноземельних елементів у їхніх межах.

Ключові слова: геологічне моделювання, просторове моделювання, рідкісноземельні елементи, структурний лінеаментний аналіз.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.04>

С. Вижва, д-р. геол. наук, проф.,

E-mail: s.vyzhva@knu.ua;

В. Онищук, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua;

І. Онищук, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: oivan1@ukr.net;

М. Рева, канд. фіз.-мат. наук, доц.,

E-mail: mvreva@gmail.com;

О. Шабатура, д-р геол. наук,

E-mail: dard@ukr.net;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна**ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ
ГЛИБОКОЗАНУРЕНИХ УЩІЛЬНЕНИХ ПОРІД КАРБОНУ
ЦЕНТРАЛЬНОГО ГРАБЕНА ДДЗ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М. І. Орлюком)**Висвітлено результати дослідження пружних і електричних властивостей глибокозанираних ущільнених теригенних порід карбону центрального грабена Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ).**Мета досліджень полягала у вивченні петрофізичних параметрів ущільнених порід-колекторів як основи комплексного аналізу їхніх фізичних властивостей. Дослідженню підлягали такі електричні та пружні характеристики зразків порід, як питомий та відносний електричний опір, параметр збільшення електричного опору, швидкість повздовжніх хвиль та інтегральний час в атмосферних і пластових умовах.**У результаті комплексного аналізу матеріалів електрометричних досліджень для порід установлені кореляційні зв'язки між питомим електричним і відносним електричним опором, а також між коефіцієнтом пористості й відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах. Залежність між питомим та відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією.**Шляхом комплексного аналізу матеріалів акустичних досліджень для алевролітів і пісковиків установлені кореляційні зв'язки: швидкостей пружних хвиль та інтервального часу з густиною і коефіцієнтом пористості в атмосферних умовах; між швидкостями повздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах; між швидкістю і коефіцієнтом пористості в пластових умовах. Залежність між швидкістю повздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією.**Фізичне моделювання пластових умов дозволяє адаптувати значення пружних і електричних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що знаходяться у пластових умовах.**Кореляційні залежності пружних і електричних параметрів із фільтраційно-ємнісними властивостями алевролітів і щільних пісковиків, отримані за результатами лабораторних петрофізичних досліджень, можуть бути основою для попередньої інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин на нових перспективних площах центрального грабена ДДЗ.**Ключові слова: алевроліти, ущільнені пісковики, питомий електричний опір, відносний електричний опір, швидкість пружних хвиль, кореляційні залежності.*

Постановка проблеми. Ущільнені породи у деяких районах містять значну кількість органіки й можуть служити як материнськими породами, так і колекторами газу. За результатами виконаних останнім часом досліджень установлено, що центральний грабен ДДЗ є одним із найперспективніших районів на наявність як традиційних (Орлюк, 2001; Тектоника..., 2015), так і нетрадиційних покладів вуглеводнів (газ ущільнених порід, сланцевий газ тощо), які можуть у разі перевищувати ресурси традиційного типу (Михайлов та ін., 2014). Розвиток новітніх технологій видобутку газу дозволяє добувати газ у значних об'ємах із багатих органікою ущільнених порід. Основу цих технологій становить буріння горизонтальних свердловин і проведення гідророзриву пласта у продуктивному інтервалі геологічного розрізу. Геофізичні та петрофізичні дослідження, а також математичне моделювання, є важливими частинами технологій, на основі яких визначаються напрямки горизонтального стовбура свердловини гідророзриву і його параметри.

Ущільнені породи, петрофізичні властивості яких наведені у цій статті, представлені низькопористими пісковиками й алевролітами. Вивчення електричних і пружних параметрів цих порід є одним із важливих засобів оцінювання нафтогазового потенціалу перспективних товщ ущільнених колекторів, що обумовлює актуальність їх петрофізичного вивчення.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Вивченню фізичних властивостей порід газонафтоперспективних районів України присвячено низку публікацій (Вижва та ін., 2012–2014, 2017–2021; Vyzhva, 2017; Карпенко та ін., 2014, 2015; Маслов та ін., 2017; Михайлов та ін., 2014; Орлюк, 2011, 2013; Orlyuk, 2018; Рибалка та Карпенко, 2016; Соболев та Карпенко, 2021; Тектоника..., 2015; Садівник, 2013) та багато інших. Акустичні й електричні параметри порід мають важливе значення для оцінювання їх колекторських властивостей за даними акустичних і електрометричних методів досліджень свердловин. Слід зазначити, що петрофізичні характеристики порід і їх кореляційні зв'язки з фільтраційно-ємнісними параметрами мають досить виражений індивідуальний характер щодо окремих різновидів порід та кожної ділянки досліджень. Тому лабораторні дослідження цих властивостей і встановлення відповідних кореляційних зв'язків між ними для кожної перспективної площі потребують окремого публічного висвітлення їх результатів.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Актуальність проблеми пошуків і розвідки нетрадиційних джерел вуглеводнів на території України є очевидною. Оцінювання перспективності на газ геологічних структур і комплексів включає їх геолого-

геометричні, економічні параметри, а також петрофізичні властивості гірських порід (у т. ч. електричні та пружні). На основі цих даних виконується оцінювання колекторських властивостей порід за матеріалами акустичних і електрометричних методів досліджень свердловин. Незважаючи на значну кількість публікацій, для багатьох перспективних площ практично відсутні дані результатів лабораторних акустичних та електрометричних досліджень ущільнених порід, а також їхніх кореляційних залежностей від фільтраційно-ємнісних параметрів.

Метою досліджень є оцінювання акустичних і електричних властивостей глибокозанурених ущільнених теригенних порід карбону перспективних на вуглеводні ділянок центрального грабена ДДЗ як основи комплексного аналізу їх фізичних параметрів та встановлення кореляційних зв'язків із фільтраційно-ємнісними властивостями. Зважаючи на те, що кореляційні зв'язки між ємнісно-фільтраційними характеристиками і даними свердловинних та польових геофізичних методів є досить складними і потребують ретельного вивчення, основою для їх визначення стає комплекс лабораторних петрофізичних досліджень. Матеріали, отримані в результаті лабораторних досліджень фільтраційно-ємнісних параметрів і густини порід, швидкості поширення пружних хвиль у них, їх питомого електричного опору, та кореляційні зв'язки між цими петрофізичними характеристиками використовуються для інтерпретації результатів акустичних і електрометричних методів досліджень свердловин, польової електророзвідки і сейсморозвідки.

Експериментальні дослідження виконані в НДЛ теоретичної і прикладної геофізики ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Комплекс петрофізичних досліджень включав визначення: густини порід; відкритої та ефективної пористості; структури капілярного простору; питомого електричного опору; швидкості пружних хвиль в атмосферних і пластових умовах (Вижва та ін., 2019б, 2020б, 2021б). Виконано також петрографічні дослідження. Усі лабораторні вимірювання виконувалися відповідно до чинних нормативних документів.

У пропонованій статті наведено результати комплексних досліджень пружних і електричних властивостей колекції зі 115 зразків ущільнених порід карбону – пісковиків (96 зразків) і алевролітів (19 зразків) центрального грабена ДДЗ, площі: Західно-Шебелинська (інтервал глибин – 4929–5491 м); Коломацька (інтервал глибин – 5290–5650 м); Веселівська (інтервал глибин – 3618–3761 м). Досліджені породи представлені алевролітами слюдистими, темно-сірими до чорних, а також пісковиками дрібнозернистими та середньозернистими, сірими і світло-сірими.

Методика акустичних та електрометричних лабораторних досліджень. Лабораторні вимірювання швидкостей поширення пружних хвиль у гірських породах виконувались ультразвуковим імпульсно-фазовим методом (Продайвода, 2004, 2007). Для лабораторних акустичних досліджень застосовувалась установка "Керн-4", яка розроблена в НДЛ теоретичної і прикладної геофізики за участі фахівців механіко-математичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Вимірювання швидкості пружних хвиль здійснювалося на спеціально виготовлених циліндричних зразках.

Лабораторні електрометричні вимірювання сухих зразків керн виконані за допомогою цифрового тераомметра С.А. 6547. Прилад дозволяє виконувати високоточні вимірювання електричного опору на постійному струмі за двохелектродною схемою в діапазоні від 10 кОм до 10 ТОм із цифровим записом результатів вимірювань на ЕОМ за спеціальною програмою (Вижва та ін., 2012–2014, 2019б–2021б; Vyzhva, 2017). Для вимірювання зразків, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl, мінералізація 196 г/л), застосовувався RCL-метр МНС-1100. Циліндричні зразки під час вимірювання поміщались у спеціальний кернотримач, розроблений у НДЛ теоретичної і прикладної геофізики.

Досліджено зміни питомого електричного опору і швидкості пружних хвиль за різного ступеня відгонки води на центрифугі ОС-6М (Породы..., 1985; Рудько, 2005) з метою визначення залежності петрофізичних параметрів від водонасичення порід. У процесі цих досліджень виконано серію вимірювань електричного опору і швидкості пружних хвиль зразків порід, насичених моделлю пластової води, до та після їх центрифугування за режимів відгонки від 1000 до 6000 об/хв із кроком 1000 об/хв, що відповідає діапазону зміни тиску витіснення води від 0 до 1 МПа (7 циклів вимірювань). Паралельно визначалися також коефіцієнти водонасичення порід.

З метою встановлення кореляційного зв'язку між електричними та швидкісними параметрами порід в атмосферних і пластових умовах виконано відповідний комплекс лабораторних петрофізичних досліджень у змодельованих пластових умовах (температура $t = 138 - 158$ °С; ефективний тиск $p_{\text{эф}} = 60 - 70$ МПа; мінералізація пластової води $M = 196$ г/л).

Середня відносна похибка визначення електричного опору порід у межах виконаних досліджень становила 3,2 %, а швидкості пружних хвиль – 2,3 %.

Аналіз даних електрометричних досліджень. У результаті лабораторних вимірювань визначено електричні параметри ущільнених порід-колекторів перспективних на вуглеводні ділянок центрального грабена ДДЗ. Дані про межі змін та середні значення наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Межі змін і середні значення електричних параметрів порід

Породи	Значення параметра	Атмосферні умови			Пластові умови	
		Питомий електричний опір, Ом·м		Відносний електричний опір, Р	Питомий електричний опір порід, насичених розчином NaCl, Ом·м	Відносний електричний опір, Р _{пл}
		сухих	насичених розчином NaCl			
Алевроліти	мін.	4447	5,8	71,2	0,8	276,7
	макс.	74400	21,8	265,5	5,6	1853,3
	сер.	36398	11,7	142,5	2,4	804,9
Пісковики	мін.	31392	2,1	25,2	0,3	88,5
	макс.	456569148	18,9	230,4	2,5	1074,5
	сер.	22911987	6,4	77,5	0,8	323,7

Лабораторними електрометричними вимірюваннями в атмосферних умовах встановлено, що питомий електричний опір (ПЕО) мінерального скелета порід (ПЕО сухих

екстрагованих зразків) змінюється: для алевролітів – від 4,447 кОм·м (алевроліт темно-сірий) до 74,4 кОм·м (алевроліт чорний) за середнього значення 36,398 кОм·м; для

пісковиків – від 31,392 кОм·м (пісковик дрібнозернистий) до 456,569 МОм·м (пісковик грубозернистий кварцовий) за середнього значення 22,912 МОм·м. Зразки порід, насичені моделлю пластової води (розчин NaCl), мають ПЕО: алевроліти – від 5,8 Ом·м (алевроліт темно-сірий) до 21,8 Ом·м (алевроліт слюди́стий) за середнього значення 11,7 Ом·м; пісковики – від 2,1 Ом·м (пісковик дрібнозернистий, світло-сірий) до 18,9 Ом·м (пісковик середньозернистий, сірий) за середнього значення 6,4 Ом·м.

Відносний електричний опір порід (P) – відношення питомого опору повністю насиченої породи ($\rho_{\text{пв}}$) до питомого опору насичувального розчину ($\rho_{\text{в}}$): $P = \rho_{\text{пв}} / \rho_{\text{в}}$ (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009) – є важливим інформаційним параметром, який широко використовується при геофізичних дослідженнях свердловин (ГДС) електрометричними методами. У результаті виконаних електрометричних досліджень установлено, що

відносний електричний опір порід змінюється: для алевролітів – від 71,2 (алевроліт темно-сірий) до 265,5 (алевроліт слюди́стий) за середнього значення 142,5; для пісковиків – від 25,2 (пісковик дрібнозернистий, світло-сірий) до 230,4 (пісковик середньозернистий, сірий) за середнього значення 77,5.

Встановлено кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості ($k_{\text{п}}$) і відносним електричним опором (P), які апроксимуються рівняннями $P = a \cdot k_{\text{п}}^{-m}$, де a – постійний коефіцієнт, m – структурний показник (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009):

$$P = 7,9356 \cdot k_{\text{п}}^{-0,691},$$

при $R^2 = 0,83$ – алевроліти;

$$P = 3,909 \cdot k_{\text{п}}^{-0,946},$$

при $R^2 = 0,84$ – пісковики.

Графіки цих залежностей наведені на рис. 1а, б.

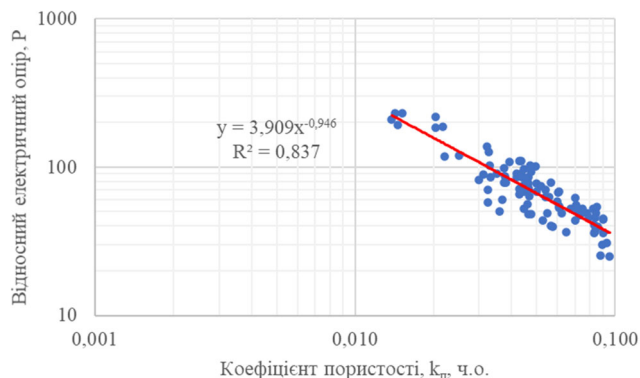
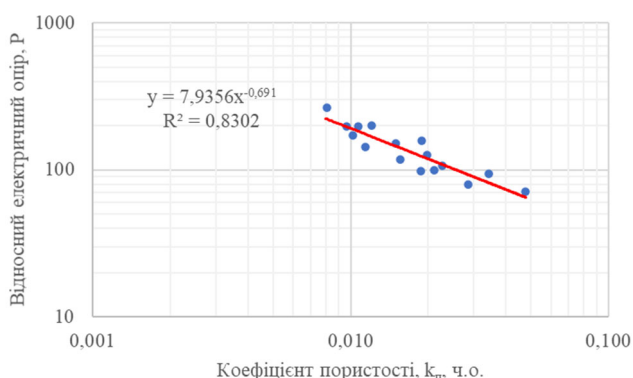


Рис. 1. Кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості ($k_{\text{п}}$) та відносним електричним опором (P):
а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

Параметр збільшення електричного опору ($P_{\text{н}}$) – відношення питомого опору частково водонасичених порід ($\rho_{\text{чв}}$) до питомого опору повністю водонасичених порід ($\rho_{\text{пв}}$): $P_{\text{н}} = \rho_{\text{чв}} / \rho_{\text{пв}}$ (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009) – є важливою геоелектричною характеристикою порід-колекторів. У результаті експериментальних лабораторних досліджень на центрифугі ОС-6М і статистичного аналізу даних електрометричних вимірювань отримані кореляційні залежності параметра $P_{\text{н}}$ від коефіцієнта водонасичення ($k_{\text{в}}$), які апроксимуються рівнянням $P_{\text{н}} =$

$b \cdot k_{\text{в}}^{-n}$, де b – постійний коефіцієнт, n – показник змочуваності, що залежить від ступеня гідрофобності зерен породи (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009). Ці залежності для досліджених порід описуються степеневими рівняннями:

$$P_{\text{н}} = 1,0957 \cdot k_{\text{в}}^{-1,933} \quad \text{при } R^2 = 0,847 \text{ – алевроліти;}$$

$$P_{\text{н}} = 1,0932 \cdot k_{\text{в}}^{-1,585}$$

при $R^2 = 0,882$ – ущільнені пісковики.

Графіки наведених залежностей представлені на рис. 2а, б.

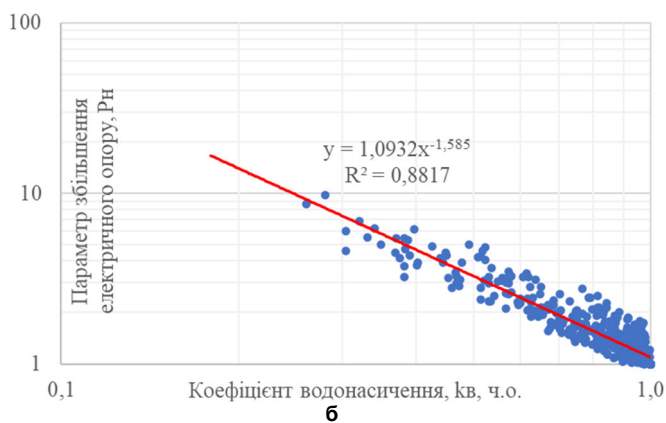
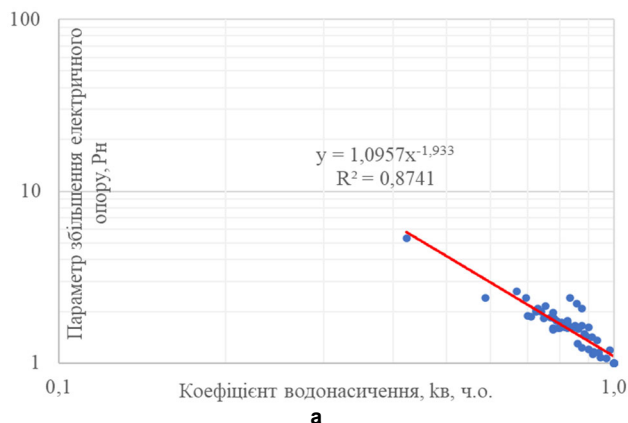


Рис. 2. Кореляційні залежності між параметром збільшення електричного опору ($P_{\text{н}}$) та коефіцієнтом водонасичення ($k_{\text{в}}$):
а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

Виконано комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000 з метою визначення питомого та відносного електричного опорів порід у пластових умовах. Вимірювання виконувались на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін і середні значення питомого й відносного електричного опору порід у пластових умовах ($t = 94 - 126\text{ }^{\circ}\text{C}$; $p_{\text{еф}} = 41 - 55\text{ МПа}$; $M = 196\text{ г/л}$) наведено у табл. 1.

Зростання питомого електричного опору зі збільшенням тиску від атмосферного до пластового пояснюється закриттям мікротріщин у породах та деформацією в них порового простору. Однак при збільшенні температури від атмосферної до пластової опір порід зменшується. Отже, маємо суперпозицію впливу двох різнонаправлених факторів на питомий електричний опір порід у пластових умовах.

При фізичному моделюванні встановлено, що питомий електричний опір досліджених алевролітів у

пластових умовах змінюється від 0,8 Ом·м до 5,6 Ом·м за середнього значення 2,4 Ом·м, а пісковиків – від 0,3 Ом·м до 2,5 Ом·м за середнього значення 0,8 Ом·м (табл. 1). Відносний електричний опір алевролітів у пластових умовах змінюється від 276,7 до 1853,3 за середнього значення 804,9, а пісковиків – від 88,5 до 1074,5 за середнього значення 323,7 (табл. 1).

У результаті комплексного аналізу даних лабораторних електрометричних вимірювань встановлено кореляційні залежності між питомими електричними опорами в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{\text{пл}}$) умовах (рис. 3а, б), між відносними електричними опорами в атмосферних (P) і пластових ($P_{\text{пл}}$) умовах (рис. 4а, б) та між відносними електричними опорами ($P_{\text{пл}}$) і коефіцієнтами пористості ($k_{\text{п,пл}}$) у пластових умовах (рис. 5а, б).

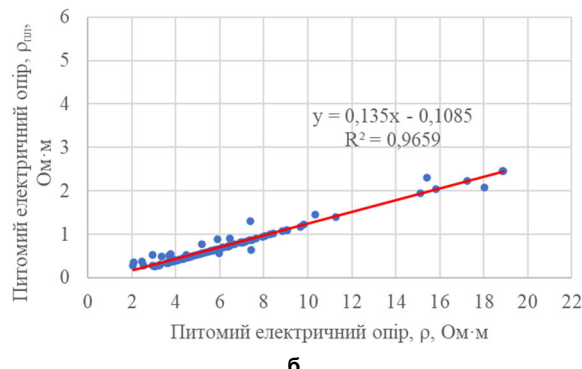
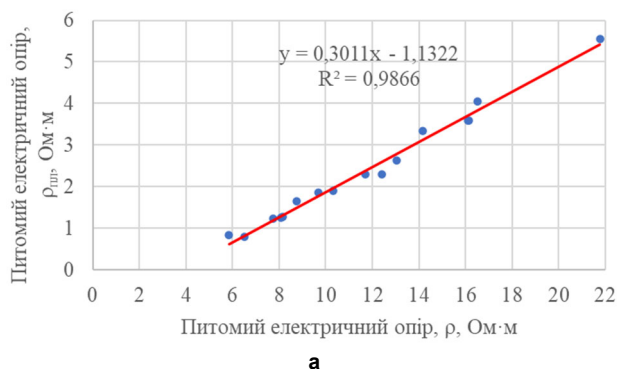


Рис. 3. Кореляційні залежності між питомим електричним опором порід в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{\text{пл}}$) умовах: а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

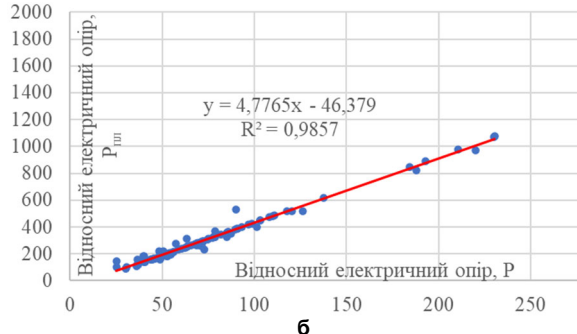
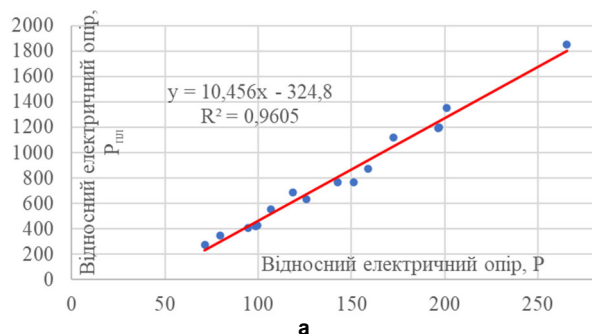


Рис. 4. Кореляційні залежності між відносним електричним опором порід в атмосферних (P) і пластових ($P_{\text{пл}}$) умовах: а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

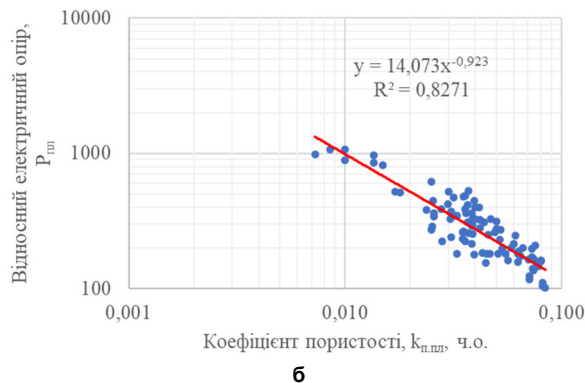
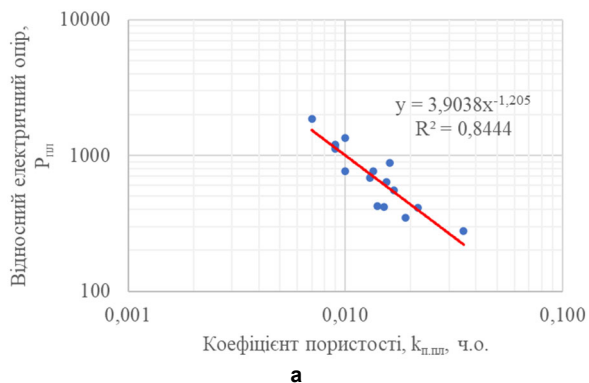


Рис. 5. Кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості ($k_{\text{п,пл}}$) і відносним електричним опором ($P_{\text{пл}}$) порід (пластові умови): а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

Аналітичні вирази кореляційних залежностей, графіки яких зображено на рис. 3–5, наведено нижче:

$$\begin{aligned} \rho_{пл} &= 0,3011 \cdot p - 1,1322, \text{ при } R^2 = 0,987 - \text{алевроліти}; \\ \rho_{пл} &= 0,135 \cdot p - 0,1085, \\ &\text{при } R^2 = 0,966 - \text{ущільнені пісковики}; \\ P_{пл} &= 10,456 \cdot P - 324,8, \text{ при } R^2 = 0,961 - \text{алевроліти}; \\ P_{пл} &= 4,7765 \cdot P - 46,379, \\ &\text{при } R^2 = 0,986 - \text{ущільнені пісковики}; \\ P_{пл} &= 3,9038 \cdot k_{пл}^{-1,205}, \text{ при } R^2 = 0,844 - \text{алевроліти}; \\ P_{пл} &= 14,073 \cdot k_{пл}^{-0,923}, \\ &\text{при } R^2 = 0,827 - \text{ущільнені пісковики}. \end{aligned}$$

Кореляційні залежності між питомими та відносними електричними опорами в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражаються лінійною

функцією (рис. 3–4), а між відносним електричним опором і коефіцієнтом пористості – степеневою функцією (рис. 5).

Установлені кореляційні залежності, графіки яких наведено на рис. 3–5, дозволяють оцінювати електричні параметри порід, що знаходяться у пластових умовах, за результатами їх лабораторного визначення в атмосферних умовах.

Результати лабораторних акустичних досліджень.

У процесі комплексних лабораторних петрофізичних досліджень виконано комплекс акустичних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль в ущільнених породах – алевролітах і низькопористих пісковицх центрального грабена ДДЗ. Результати вимірювання швидкості повздовжніх пружних хвиль наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Межі змін і середні значення швидкостей та інтервального часу повздовжніх пружних хвиль порід

Породи	Значення параметра	Атмосферні умови				Пластові умови	
		Швидкість повздовжніх хвиль, м/с		Інтервальний час, мс/м		Швидкість повздовжніх хвиль, м/с	Інтервальний час, мс/м
		сухих	насичених розчином NaCl	сухих	насичених розчином NaCl		
Алевроліти	мін.	3810	4531	193	191	4309	192
	макс.	5177	5222	262	221	5201	232
	сер.	4653	5001	217	200	4899	204
Пісковики	мін.	2425	3891	224	187	3662	178
	макс.	4463	5360	412	257	5622	273
	сер.	3624	4595	281	219	4603	219

Лабораторними акустичними вимірюваннями в атмосферних умовах встановлено, що в екстрагованих сухих алевролітах швидкість поширення повздовжніх пружних хвиль змінюється від 3810 м/с (алевроліт темно-сірий) до 5177 м/с (алевроліт слюдяний) за середнього значення 4653 м/с, а інтервальний час – від 193 до 262 мс/м за середнього значення 217 мс/м. Швидкість поширення повздовжніх пружних хвиль у пісковицх змінюється від 2425 м/с (пісковицх крупнозернистий кварцовий) до 4463 м/с (пісковицх середньозернистий сірий) за середнього значення 3624 м/с, а інтервальний час – від 224 до 412 мс/м за середнього значення 281 мс/м.

У насичених моделлю пластової води алевролітах швидкість повздовжніх хвиль змінюється від 4531 до 5222 м/с за середнього значення 5001 м/с, а інтервальний час – від 191 до 221 мс/м за середнього значення 200 мс/м. Швидкість повздовжніх хвиль у пісковицх змінюється від 3891 до 5360 м/с за середнього значення 4595 м/с, а інтервальний час – від 187 до 257 мс/м за середнього значення 219 мс/м.

У результаті аналізу акустичних досліджень в атмосферних умовах встановлено низку кореляційних залежностей між швидкостями пружних хвиль (V_p) та інтервальним часом (t_p) і коефіцієнтом пористості (k_n) та густиною досліджених порід (δ), насичених розчином NaCl, графіки яких представлено на рис. 6–9.

Аналітичні вирази вищевстановлених кореляційних залежностей наведено нижче:

$$\begin{aligned} V_p &= -13994 \cdot k_n + 5253,7 \text{ при } R^2 = 0,763 - \text{алевроліти}; \\ V_p &= -15323 \cdot k_n + 5407,4, \\ &\text{при } R^2 = 0,836 - \text{ущільнені пісковики}; \\ t_p &= 591,09 \cdot k_n + 189,49, \text{ при } R^2 = 0,779 - \text{алевроліти}; \\ t_p &= 744,48 \cdot k_n + 179,41, \\ &\text{при } R^2 = 0,84 - \text{ущільнені пісковики}; \\ V_p &= 3,2104 \cdot \delta - 3578,7, \text{ при } R^2 = 0,69 - \text{алевроліти}; \\ V_p &= 6,6916 \cdot \delta - 12472, \\ &\text{при } R^2 = 0,807 - \text{ущільнені пісковики}; \\ t_p &= -0,1368 \cdot \delta + 565,75, \text{ при } R^2 = 0,717 - \text{алевроліти}; \\ t_p &= -0,3182 \cdot \delta + 1042,8, \\ &\text{при } R^2 = 0,8 - \text{ущільнені пісковики}. \end{aligned}$$

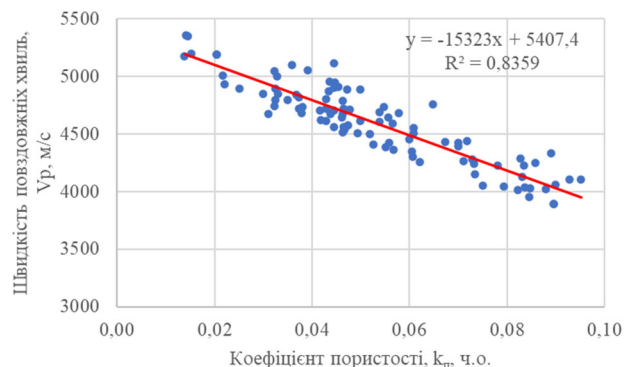
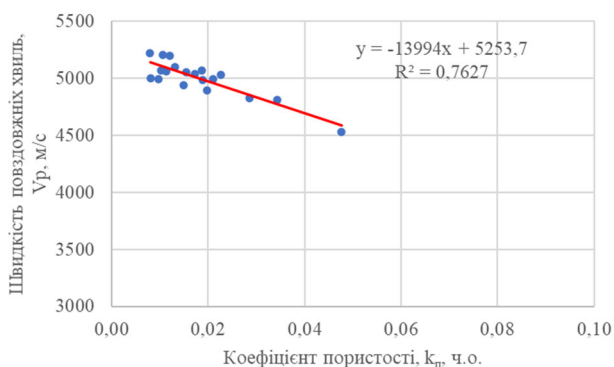


Рис. 6. Кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості (k_n) і швидкістю повздовжніх хвиль (V_p): а – алевроліти; б – ущільнені пісковики

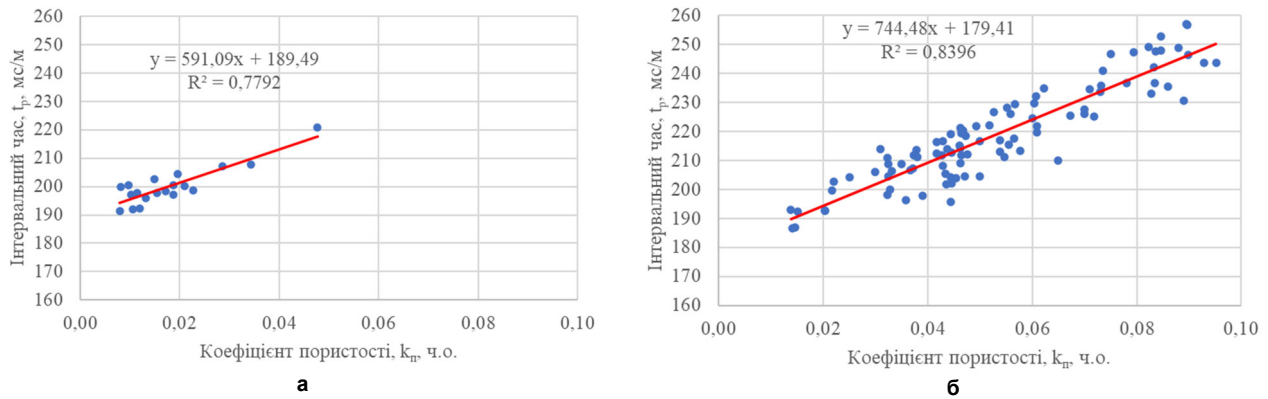


Рис. 7. Кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості (k_p) та інтервальним часом (t_p): а – алевроліти; б – ущільнені пісковики

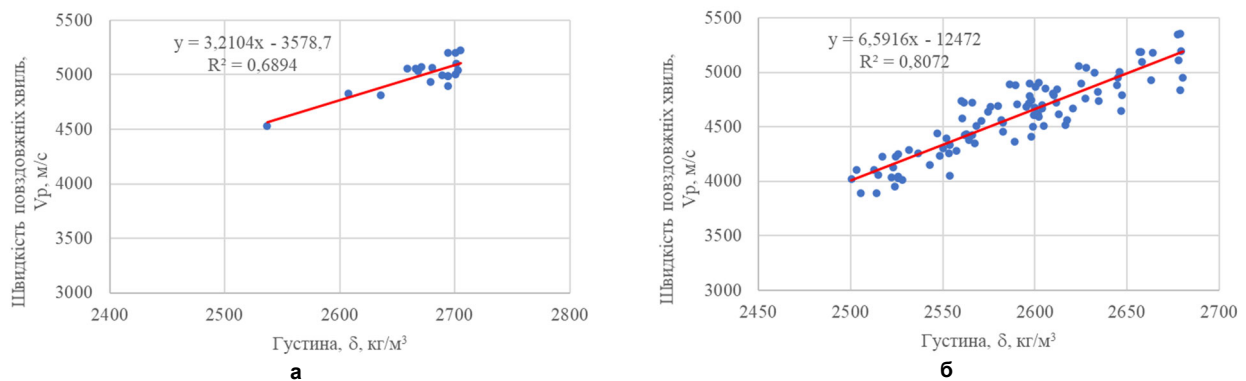


Рис. 8. Кореляційні залежності між густиною (δ) і швидкістю повздовжніх хвиль (V_p): а – алевроліти; б – ущільнені пісковики

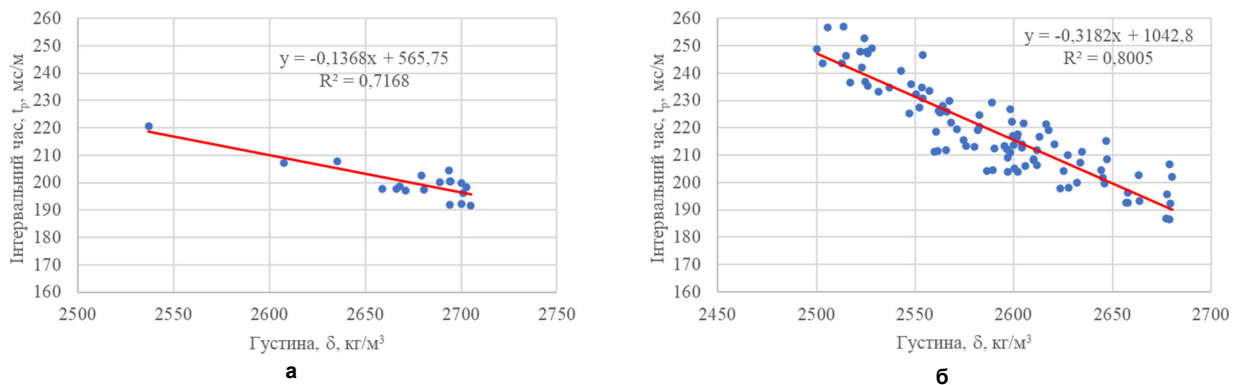


Рис. 9. Кореляційні залежності між густиною (δ) і інтервальним часом (t_p): а – алевроліти; б – ущільнені пісковики

З метою визначення швидкості поширення повздовжніх хвиль у пластових умовах $V_{p,пл}$ проведені комплексні дослідження на спеціалізованій установці високого тиску ВСЦ-1000. Вимірювання виконувалися на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін і середні значення $V_{p,пл}$ та інтервального часу $t_{p,пл}$ порід у пластових умовах наведено в табл. 2. За допомогою фізичного моделювання пластових умов встановлено, що швидкість повздовжніх хвиль у досліджених породах зростає зі збільшенням тиску. Це відбувається внаслідок закриття в породах мікротріщин та деформації порового простору. Встановлено, що швидкість повздовжніх хвиль змінюється: для алевролітів – від 4309 до 5201 м/с за середнього значення 4899 м/с, а інтервальний час – від 192 до 232 мс/м за середнього значення 204 мс/м. Швидкість повздовжніх хвиль пісковиків змінюється від 3662

до 5622 м/с за середнього значення 4603 м/с, а інтервальний час – від 178 до 273 мс/м за середнього значення 219 мс/м (табл. 2).

У результаті комплексного аналізу даних лабораторних акустичних досліджень для вивчених порід встановлені кореляційні залежності між швидкістю повздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах (рис. 10), а також між коефіцієнтом пористості ($k_{p,пл}$) і швидкістю пружних хвиль ($V_{p,пл}$) та інтервальним часом ($t_{p,пл}$) у пластових умовах (рис. 11, 12), які виражаються лінійними функціями.

Аналітичні вирази вищевстановлених кореляційних залежностей наведено нижче:

$$V_{p,пл} = 1,2829 \cdot V_p - 1516,8, \text{ при } R^2 = 0,98 \text{ – алевроліти;}$$

$$V_{p,пл} = 1,2976 \cdot V_p - 1360,1, \text{ при } R^2 = 0,953 \text{ – ущільнені пісковики;}$$

$V_{p,пл} = -28357 \cdot k_{п,пл} + 5295,8$,
при $R^2 = 0,783$ – алевроліти;
 $V_{p,пл} = -21150 \cdot k_{п,пл} + 5553,5$,
при $R^2 = 0,808$ – ущільнені пісковики;

$t_{p,пл} = 1269,9 \cdot k_{п,пл} + 186,72$, при $R^2 = 0,808$ – алевроліти;
 $t_{p,пл} = 1035 \cdot k_{п,пл} + 172,95$,
при $R^2 = 0,812$ – ущільнені пісковики

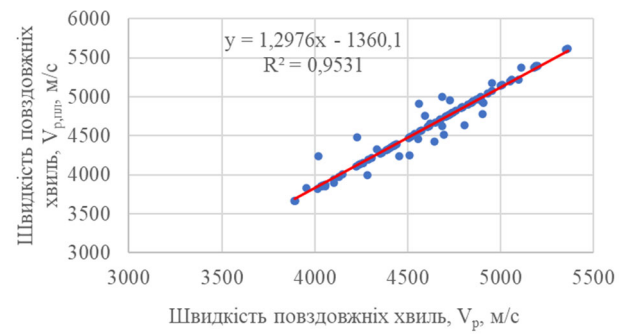
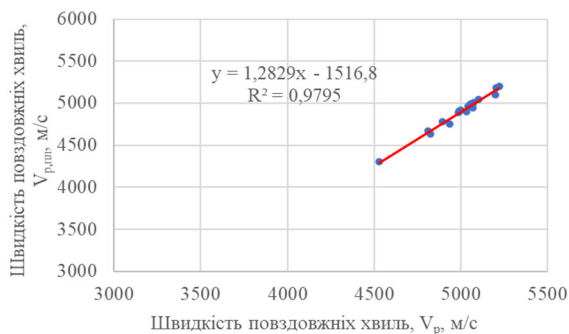


Рис. 10. Кореляційна залежність між швидкістю повздовжніх хвиль в атмосферних (V_p) і пластових ($V_{p,пл}$) умовах: а – алевроліти; б – ущільнені пісковики

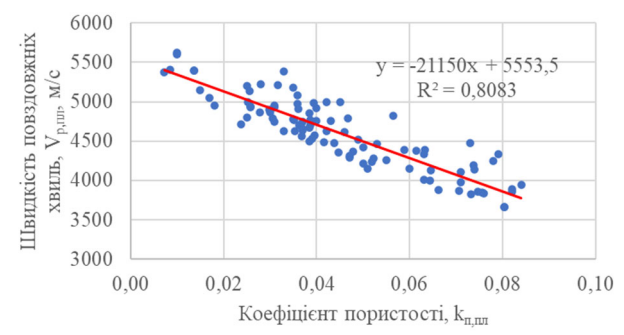
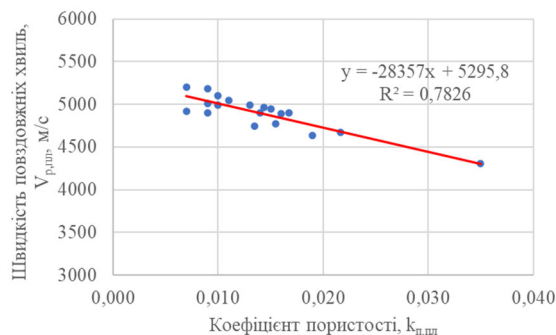


Рис. 11. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) і швидкістю повздовжніх хвиль ($V_{p,пл}$) у пластових умовах: а – алевроліти; б – ущільнені пісковики

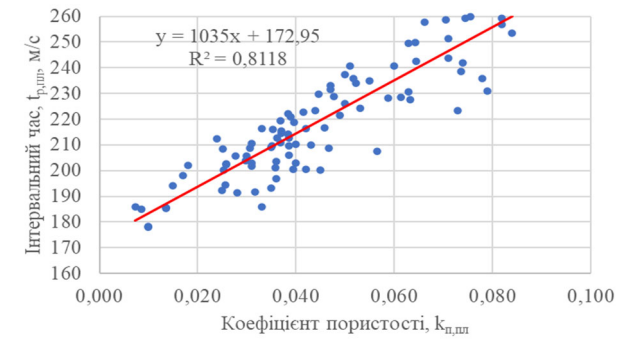
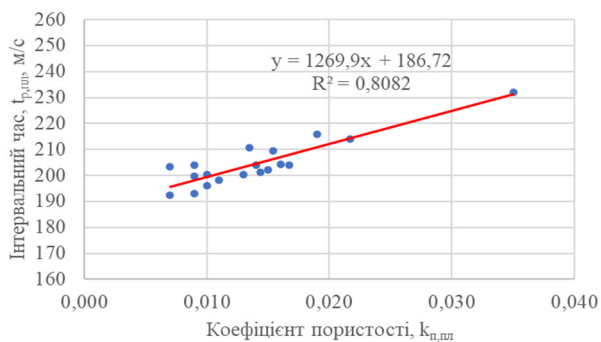


Рис. 12. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) та інтервальним часом ($t_{p,пл}$) у пластових умовах: а – алевроліти; б – ущільнені пісковики

Висновки. У статті наведено результати комплексних досліджень петрофізичних властивостей колекції зі 115 зразків ущільнених порід (пісковиків і алевролітів), відібраних на 3 пошукових площах центрального грабена ДДЗ в інтервалах глибин від 3618 до 5650 м.

Лабораторними електрометричними вимірюваннями встановлено, що питомий електричний опір мінерального скелета (опір сухих екстрагованих порід) змінюється: для алевролітів – від 4,447 до 74,4 кОм·м (середнє значення 36,398 кОм·м); для пісковиків – від 31,392 кОм·м до 456,569 МОм·м (середнє значення 22,912 МОм·м). Значні варіації питомого опору зразків пояснюються неоднорідностями у структурі та текстурі порід (наявність глинистих і піщаних прошарків та включень). Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової рідини,

змінюється: для алевролітів – від 5,8 до 21,8 Ом·м (середнє значення 11,7 Ом·м); для пісковиків – від 2,1 до 18,9 Ом·м (середнє значення 6,4 Ом·м). За середніми значеннями опорів алевроліти і пісковики суттєво відрізняються.

У результаті петрофізичних досліджень визначено відносний електричний опір порід в атмосферних умовах. Цей параметр змінюється: для алевролітів – від 71,2 до 265,5 (середнє значення 142,5); для пісковиків – від 25,2 до 230,4 (середнє значення 77,5).

На основі проведених електрометричних досліджень способом центрифугування зразків установлено кореляційний зв'язок між параметром збільшення електричного опору і коефіцієнтом водонасичення, який виражається степенною функцією.

У результаті фізичного моделювання пластових умов встановлено, що питомий електричний опір змінюється: для алевролітів – від 0,8 до 5,6 Ом-м (середнє значення 2,4 Ом-м); для пісковиків – від 0,3 до 2,5 Ом-м (середнє значення 0,8 Ом-м). Вимірювання питомого опору порід за різних тисків показали, що внаслідок закриття мікротріщин та деформації порового простору електричний опір порід зростає зі збільшенням тиску, при цьому залежність коефіцієнта збільшення питомого електричного опору від тиску для досліджених порід виражається поліномом другого порядку. Однак збільшення температури в пластових умовах спричинює зворотний процес – опір зменшується. Дослідженнями відносного електричного опору порід у пластових умовах встановлено, що цей параметр змінюється: для алевролітів – від 276,7 до 1853,3 (середнє значення 804,9); для пісковиків – від 88,5 до 1074,5 (середнє значення 323,7).

У результаті комплексного аналізу матеріалів електрометричних досліджень для порід встановлено кореляційні зв'язки між питомим електричним і відносним електричним опором, а також між коефіцієнтом пористості й відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах. Залежність між питомим та відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією. Фізичне моделювання пластових умов дозволяє адаптувати значення електричних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що знаходяться в пластових умовах.

Акустичними вимірюваннями в атмосферних умовах встановлено, що швидкість поширення повздовжніх хвиль у сухих екстрагованих породах змінюється: для алевролітів – від 3810 до 5177 м/с (середнє значення 4653 м/с); для пісковиків – від 2425 до 4463 м/с (середнє значення 3624 м/с). Швидкість повздовжніх хвиль порід, насичених моделлю пластової води, змінюється: для алевролітів – від 4531 до 5222 м/с (середнє значення 5001 м/с); для пісковиків – від 3891 до 5360 м/с (середнє значення 4595 м/с).

У результаті фізичного моделювання пластових умов встановлено, що швидкість повздовжніх хвиль змінюється: для алевролітів – від 4309 до 5201 м/с (середнє значення 4899 м/с); для пісковиків – від 3662 до 5622 м/с (середнє значення 4603 м/с). Зі збільшенням тиску швидкість повздовжніх хвиль зростає внаслідок закриття мікротріщин і деформації порового простору. Залежність збільшення швидкості від тиску описується поліномом другого порядку.

Шляхом комплексного аналізу матеріалів акустичних досліджень для алевролітів і пісковиків встановлено кореляційні зв'язки: між швидкостями пружних хвиль і густиною та коефіцієнтом пористості в атмосферних умовах; між швидкостями повздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах; між швидкістю і коефіцієнтом пористості в пластових умовах. Залежність між швидкістю повздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією. Фізичне моделювання пластових умов дозволяє адаптувати значення акустичних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що знаходяться у пластових умовах.

Кореляційні залежності акустичних та електричних параметрів із фільтраційно-ємнісними властивостями алевролітів і щільних пісковиків, отримані за результатами лабораторних петрофізичних досліджень, можуть бути основою для попередньої інтерпретації даних

геофізичних досліджень свердловин на нових перспективних площах центрального грабена ДДЗ.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми №21БП049-01.

Автори висловлюють щире подяку ст. лаборанту Цуману В. С. за його активну й високопрофесійну участь у підготовці зразків і лабораторних дослідженнях.

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), 1–9.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2014а). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофизический журнал*, 36, 1, 145–157.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2014б). Електричні параметри порід-колекторів імпактних структур. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 65, 31–35.
- Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019б). Петрофізичні параметри порід візейського ярусу Лохвицької зони Дніпровсько-Донецької западини. *Геофизический журнал*, 41, 4, 145–160.
- 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*, 83, 30–37.
- Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019а). Електричні параметри порід верхнього карбону Руновщинської площі ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 85, 37–45.
- Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Олійник, О.В., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2020а). Фільтраційно-ємнісні параметри нижньопермських 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. (2020б). Електричні та акустичні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2 (89), 49–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07>
- Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2021а). Фільтраційно-ємнісні параметри ущільнених порід північної прибережної зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3 (94), 37–45. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04>
- Вижва, С.А., Онищук, В.І., Орлюк, М.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2021б). Електричні і пружні параметри ущільнених порід карбону східної частини північної прибережної зони ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4 (95), 25–33. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03>
- Вижва, С.А., Онищук, Д.І., Онищук, В.І. (2012). Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 57, 13–16.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, І.І. (2017). Петрофизические особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79, 12–20.
- Дахнов, В.Н. (1975). Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. М.: Недра.
- 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. DOI: [10.17721/1728-2713.66.12](http://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*, 68, 49–54.
- Маслов, Б.П., Онищук, І.І., Шинкаренко, А.В. (2017). Моделювання нелінійних в'язко-пружних властивостей терригенно-вапняковистих пісковиків. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 77, 99–105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13>
- Михайлов, В.А., Вижва, С.А., Загітко, В.М. та ін. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. Кн. IV. К.: ВПЦ "Київський університет".
- Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В. (2013). Физические параметры пород осадочного чехла северо-западной части Днепро-Донецкой впадины. *Геофизический журнал*, 35, 2, 127–136.
- Орлюк, М.І., Пашкевич, І.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.

Орлюк, М.І. (2001). Магнітна модель земної кори Центральної депресії Дніпровсько-Донецької западини у зв'язку з прогнозуванням її нафтогазоносності. *Теоретичні та прикладні проблеми нафтогазової геофізики*. Київ: УкрДГРІ, 62–66.

Породы горные. (1985). Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации: ГОСТ 26450.2–85. М.: Миннео СССР.

Продайвода, Г.Т. (2004). Акустика текстур гірських порід. Київ: ВГЛ "Обрії".

Продайвода, Г.Т. (2007). Математичне моделювання ефективних термомпружних властивостей багатокомпонентного тріщинуватого геологічного середовища, насиченого флюїдом з внутрішнім тиском. *Геофизический журнал*, 3, 122–130.

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. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08>

Рудько, Г.І., Нестеренко, М.Ю. та ін. (2005). Обґрунтування кондиційних значень фільтраційно-ємнісних параметрів теригенних порід-колекторів для підрахунку запасів вуглеводнів. Методичні вказівки. Київ-Львів.

Садівник, М.І., Федорішин, Д.Д., Трубенко, С.Д., Федорішин, С.Д. (2013). Вплив пластового тиску на електричні параметри гірських порід. *XII Міжнародна конференція "Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти"*, Київ, Україна (електронна публікація).

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. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09>

Старостенко, В.І., Русаков, О.М. (2015). Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Киев: "Галактика".

Тябб, Д., Дональдсон, Э.Ч. (2009). Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. "Премиум Инжиниринг".

Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V., Onyshchuk, I.I., Solodkyi, I.V. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with geomagnetic field and fault-block tectonics in the Glyns'ko-Solokhiv's'kiy oil-and-gas region. *Геодинаміка*, 2 (25), 71–88. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>.

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. DOI: 10.18668/NG.2017.02.03

Reference

Dakhnov, V.N. (1975). Geophysical methods for the determination of reservoir properties and oil and gas saturation of rocks. Moscow: Nedra. [in Russian]

Karpenko, O., Bashkurov, G., Karpenko, I. (2014). Geophysical data: Estimating organic matter in rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(66), 71–76. DOI: 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. [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. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13> [in Ukrainian]

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

Orlyuk, M.I. (2001). Magnetic model of the earth's crust of the Central depression of the Dnieper-Donetsk depression in connection with the prediction of its oil and gas potential. *The Theoretical and applied problems of oil and gas geophysics*, Kyiv, 62–66. [in Ukrainian]

Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V. (2013). Physical parameters of rocks sedimentary cover of the northwestern part of the Dnieper-Donets depression. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 35, 2, 12–136. [in Russian]

Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V., Onyshchuk, I.I., Solodkyi, I.V. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with geomagnetic field and fault-block tectonics in the Glyns'ko-Solokhiv's'kiy oil-and-gas region. *Geodynamics*, 2 (25), 71–88. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>

Orlyuk, M.I., Pashkevich, I.K. (2011). Magnetic characteristics and fault tectonics of the earth's crust of the Shebelinskaya group of gas fields as an integral part of complex search criteria for hydrocarbons. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 33, 6, 136–151. [in Russian]

Prodayvoda, G.T. (2004). Acoustics textures of rocks. Kyiv: Horizons. [in Ukrainian]

Prodayvoda, G.T. (2007). Mathematical modeling of effective thermoelastic properties of the multi-fractured geological environment saturated with fluid internal pressure. *Geophysical Journal*, 3, 122–130. [in Russian]

Rudko, G.I., Nesterenko, M.Yu. et al. (2005). Substantiating of the conditioning data of the reservoir parameters of terrigenous reservoirs for calculation of hydrocarbon reserves. Methodology guidelines. Kyiv-Lviv: UkrDHRI.

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), 56–59. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08> [in Ukrainian]

Sadivnik, M., Fedoryshyn, D., Trubenko, O., Fedoryshyn S. (2013). Influence of Formation Pressure on the Electrical Characteristics of Rocks. *12th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, Kiev. [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].

Starostenko, V.I., Rusakov, O.M. (2015). Tectonics and hydrocarbon potential of the crystalline basement of the Dnieper-Donetsk depression. Kyiv: Galaktika. [in Russian]

The rocks. (1985). Methods for determination of reservoir properties. Method for determination of absolute permeability coefficient under stationary and non-stationary filtration (GOST 26450.2–85). Moscow: Mingeo USSR. [in Russian]

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

Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onyshchuk, D., Onyshchuk, I. (2014b). Reservoir Rocks in Impact Structures: Electrical Parameters. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 65, 31–35. [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. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.02> [in Russian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, D., Onyshchuk, V. (2012). Petroelectrical investigations of reservoir rocks of Western-Shebelynske gas condensate field. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 57, 13–16. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Oliynyk, O., Reva, M., Shabatura, O. (2020a). Lower permian carbonate deposits reservoir parameters of western part of Hlyn'sko-Solohiv's'ka 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., Orlyuk, M., Drukarenko, V., Reva, M., Shabatura, O. (2019b). Petrophysical parameters of rocks of the Visean stage (Lokhvitsky zone of the Dnieper-Donets Basin). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41, 2, 145–160. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Electrical and acoustic parameters of lower permian carbonate rocks (western part of the Hlyn'sko-Solohiv's'kiy of gas-oil-bearing district of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (89), 49–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07>. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2021a). 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. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04> [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, N., Shabatura, O. (2018). Reservoir features of the upper carbon sediments (Runovshchyn's'ka area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 83, 30–37. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, N., Shabatura, O. (2019a). Electrical parameters of the upper carbon rocks (Runovshchyn's'ka area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 85, 37–45. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Orlyuk, M., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2021b). Electric and elastic parameters of carbonic period terrigenous rocks of the eastern part of the northern edge of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (95), 25–33. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03> [in Ukrainian]

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. [in Ukrainian]

Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onyshchuk, I.I. (2014a). Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donets depression promising for shale gas. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36, 2, 145–157. [in Ukrainian]

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. DOI: 10.18668/NG.2017.02.03

Надійшла до редколегії 21.03.22

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: s.vyzhva@knu.ua;
V. Onyshchuk, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua;
I. Onyshchuk, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: oivan1@ukr.net;
M. Reva, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
O. Shabatura, Dr. Sci. (Geol.),
E-mail: dard@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ELECTRIC AND ELASTIC PROPERTIES OF DEEP-SEATED CONSOLIDATED ROCKS OF CARBONIFEROUS PERIOD OF THE CENTRAL GRABEN OF THE DNIEPER-DONETSK DEPRESSION

Paper concerned the research of elastic and electric properties of deep-seated consolidated terrigenous rocks of Carboniferous period of the Central graben of the Dnieper-Donetsk depression (DDD).

The purpose of the research was to study the petrophysical parameters of the consolidated reservoir rocks, as the basis of the integrated analysis of their physical properties. Such electric and elastic parameters of rock samples as resistivity and formation resistivity factor, formation resistivity enlargement factor, velocities of the P-waves and interval (transit) time have been studied.

The correlation analysis has allowed establishing a series of empirical relationships between resistivity and formation resistivity factor, and between porosity and formation resistivity factor in atmospheric and reservoir conditions. The correlation relationships of the resistivity with formation resistivity factor manifest itself in linear function. Physical modeling of reservoir conditions allows adapting the values of electrical parameters obtained in atmospheric conditions to parameters of rocks in reservoir conditions.

Laboratory acoustic study of siltstones and sandstones managed to establish correlation relationships of: velocities of the P-waves and interval (transit) time with density and porosity in atmospheric conditions; velocities of the P-waves in atmospheric and reservoir conditions; velocities with porosity in reservoir conditions. The dependence of the velocities of the P-waves in atmospheric and reservoir conditions for the studied rocks manifest itself in linear function. Physical modeling of reservoir conditions allows adapting the values of elastic parameters obtained in atmospheric conditions, to parameters of rocks in reservoir conditions.

The correlation relationships of the electric and elastic properties with reservoir properties of siltstones and consolidated sandstones which were obtained in laboratory petrophysical research should be at the basis of preliminary interpretation of geophysical data on new areas of the Central graben of DDD.

Keywords: consolidated sandstones, siltstones, resistivity, formation resistivity factor, velocity of elastic waves, correlation relationships.

UDC 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.05>O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: menshov.o@ukr.net,Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

MAGNETIC MINERALOGICAL ANALYSIS OF SOILS AS A PART OF THE INTEGRATED GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL MODEL FOR THE HYDROCARBON PROSPECTING

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

Magnetic minerals form or alter in the presence of hydrocarbons, making them a potential magnetic proxy for identifying hydrocarbon migration pathways. We concentrate in the precision magnetic mineralogical analyzes to understand what magnetic minerals in soil from the hydrocarbon fields are responsible for the magnetic signal. To illustrate the results of our studying, we consider the study area of the hydrocarbon deposits near the village Balabanivka, Bogodukhiv district, Kharkiv region. A collection of soil samples is represented by deep medium-humus chernozems. The thermomagnetic analyzes, hysteresis parameters, and isothermal remanent magnetization curves (IRM) were studied for the samples collected near the well (point PR 28) and at the area located out of the hydrocarbon influence zone (point PR 0403). To study the thermomagnetic parameters, different types of the magnetization and magnetic susceptibility (MS, χ), and hysteresis loops we used the Variable Field Translation Balance (VFTB) instrument. The results are confirmed by the highest values of the gas geochemical parameters. The MS variations at temperatures ranging from 200 to 400 °C may reflect the presence of either iron sulphides or maghemite. The magnetite occurs for all soils. The wasp-waisted hysteresis loops identified either a mixture of two magnetic minerals (magnetite and hematite) and the admixture of the superparamagnetic and larger grains of the same minerals.

Keywords: tight oil and gas, hydrocarbons, soils, environmental magnetism, magnetic susceptibility, magnetization.

Introduction.

The current situation of the economic development in Ukraine require the development of the oil and gas production. The intensification of the process leads to the need for significant financial costs for energy sector. This situation is considered in the context of national security and requires urgent management decisions, which are based on data from industry organizations and audits. One of the possible ways to increase the production of raw materials of its own origin is not deeply studied sources of compacted oil and gas reservoirs.

Magnetic minerals form or alter in the presence of hydrocarbons, making them a potential magnetic proxy for identifying hydrocarbon migration pathways (Badejo *et al.*, 2021). The application of soil magnetism in the oil and gas sector is based on their unique ability to carry information about deep geological processes and near-surface anthropogenic activity (Menshov, 2018; Menshov *et al.*, 2016). The physical and chemical basis of the method is the fact of migration of hydrocarbon fluid from the deposit to the upper near surface geological layers as well as to the soil. During the microseepage and the hydrocarbons migration, the fluids generate a change and formation of new magnetic minerals (authigenic minerals). Due to this phenomenon, soils acquire new or altered magnetic properties that can be identified in the field and laboratory conditions. In the process of complex interpretation with other geophysical and geochemical methods, new information on possible deposits of oil and gas is obtained. In addition, information on the magnetic properties of soils allows us to assess the pollution and impact on agronomic properties of lands (Menshov, 2016). Such information is especially relevant when perform studies at the areas of non-traditional reservoirs as well as to control the fracturing process.

The fact of uniqueness of the magnetic method is decisive, because the genesis of the deposit does not matter for its application. This means that magnetic studies are independent from the geological nature of the deposit – non-traditional type or classical deposit. Therefore, magnetic methods in the study of areas of compacted oil and gas reservoirs, soils and the upper part of the geological section can use physical and chemical bases and existing developments in relation to classical oil and gas prospecting.

In this paper, we concentrate in the precision magnetic mineralogical analyzes to understand what magnetic

minerals in soil from the hydrocarbon fields are responsible for the magnetic signal.

State of the art.

Rock magnetic experiments identify a range of magnetite, maghemite, iron sulphides, siderite, goethite and titanohematite, some of which are part of the background signal, and some due to the presence of hydrocarbons. Typical concentrations of the magnetic minerals are 10–200 ppm. Badejo *et al.*, 2021 identified an increasing presence of authigenic iron sulphides (likely pyrite and greigite) along the identified lateral hydrocarbon migration pathway. This is likely caused by biodegradation resulting in the precipitation of iron sulphides, however, though less likely, it could alternatively be caused by mature oil generation, which subsequently travelled with the migrating oil to the traps. These observations suggest mineral magnetic techniques could be a rapid alternative method for identifying the severity of biodegradation or oil maturity in core sample, which can then be used to calibrate petroleum systems models.

Kessouri and Ustra, 2019 proposed a laboratory approach that includes quantitative analysis of different magnetic properties: thermomagnetic measurements, frequency dependent susceptibility (FDS) and isothermal remanent magnetization (IRM). We used soil samples from the Brandywine superfund site contaminated with dense non-aqueous phase liquids (DNAPLs) and remediated using amendment injections to enhance the hydrocarbon biodegradation. Thermomagnetic analysis shows a difference between treated and untreated samples: magnetite is observed mostly in the untreated samples, when another magnetic mineral with a Curie temperature around 300°C is observed in the treated samples. This could correspond to a reduced form of magnetite such as pyrrhotite or greigite that would indicate microbial reduction.

A combined study of rock-magnetism and electronic-paramagnetic resonance (EPR) was performed by Costanzo-Álvarez *et al.*, 2019 in core samples from an oil well in the Vaca Muerta Formation (SW Argentina). The aim of this work was to characterize the effects of hydrocarbon-related diagenesis on the magnetic signature of oil shales. The hydrocarbon-induced magnetic anomalies in these oil shales are conditioned mostly by their petrophysical properties. The reactive organic matter free radicals, resulting from the thermal degradation of a kerogen that

© Menshov O., 2022

yields a slightly-biodegraded crude oil, seem to have acted on the primary Fe oxides and sulfides through two diagenetic stages. The second diagenetic stage could have produced partial replacement of framboidal pyrite by authigenic pyrrhotite, as recognized by scanning electron microscopy (SEM), electron X-ray energy dispersion (EDX) experiments and the analysis of the thermomagnetic and IRM curves *De la Rosa et al., 2021* integrate satellite image spectral analyses with rock magnetic and geochemical data (i.e., mass-specific magnetic susceptibility χ , saturation isothermal remanent magnetization SIRM, analysis of SIRM acquisition curves, absorption spectro-radiometry, and X-ray diffraction analyses). This case study illustrates the potential of such an integrated method as an oil exploration tool, and a means to assess the level and scope of the environmental impact produced by hydrocarbon seepage on terrestrial ecosystems.

As was mentioned in introduction, the magnetic studies of the soil at the areas of the compacted reservoirs are important in terms of the environmental issues. *Ayoubi et al., 2020* concluded that through the world as well as in Iran, petroleum hydrocarbons have majority contribution in environmental risks for human and other organisms. Therefore, they evaluate hydrocarbon pollution effects on soil chemical properties, as well as soil magnetic susceptibility (MS) on a petroleum refinery compound in Isfahan province, Iran. Enhancement of magnetic susceptibility presumably attributed to formation of ferrimagnetic minerals such as magnetite because of degradation of hydrocarbon compounds.

The studies (*Abdelazeem et al., 2021*) aim to detect the Phanerozoic sedimentary sub-basins and their hydrocarbon potentialities within the Qattara Ridge in the northern Western Desert, Egypt, through the interpretation of high-resolution land magnetic data. Reducing gases, coming from the possible underlying hydrocarbon reservoir, play a critical role in the formation of these secondary magnetic minerals. The reservoir in the Qattara Ridge, based on the present study, is characterized by low magnetic susceptibility and low surface magnetic anomaly in the studied locations of productive wells.

Sechman et al., 2020 evaluated the relationship between the distributions of direct and indirect, surface geochemical indices in the selected part of the Outer Carpathians. The research included analysis of molecular composition of soil gas samples and calcite contents as well as the measurements of magnetic susceptibility and pH of soil samples. Comprehensive interpretation of the results obtained by direct and indirect methods in this paper provides another positive example helping to better understand the complicated mechanism of hydrocarbon migration and the potential usefulness of indirect methods suitable for hydrocarbon exploration.

Study Site and Methods.

To illustrate the results of our studying, we consider the study area of the hydrocarbon deposits near the village Balabanivka, Bogodukhiv district, Kharkiv region. A collection of soil samples is represented by deep medium-humus chernozems. The samples were collected within the influence areas of Nedilna-1 (productive) and Nedilna-2 (non-productive) wells.

The geometry of the study site with the sampling points and the map of the magnetic susceptibility is given in Fig. 1 (retrieved from the bachelor diploma of B. Kruhlov). More information about the study site was described in *Menshov, 2021*.

Magnetic mineralogical measurements were performed at the Magnetic Laboratory of the Department of the Earth and Environmental Studies of the Ludwig-Maximilians-

Universität München. To study the thermomagnetic parameters, different types of the magnetization and magnetic susceptibility, and hysteresis loops we used the Variable Field Translation Balance (VFTB) instrument. VFTB provide the possibility of the measurements of the magnetization and magnetic susceptibility, thermomagnetic curves at -180°C to 800°C (simultaneous measurement of magnetization and susceptibility), isothermal remanent magnetization IRM (full temperature range), backfield (full temperature range), hysteresis loops (full temperature range), and FORC diagrams. VFTB is a sensitive and versatile instrument for measurement of magnetic properties of materials. Due to its high sensitivity, it is an ideal instrument for research in rock magnetism and environmental magnetism and can measure weakly magnetic materials, such as sandstone, limestone, soil etc. It can also be used for magnetic analysis in the field of material science e.g. analysis of synthetic materials, thermal behavior of permanent magnets etc. It is the only instrument on the market that can simultaneously measure the reversible and irreversible components of magnetization and their temperature dependence. This makes it an instrument that is particularly suited for discrimination of different magnetic phases in the sample. RockMag Analyzer software was used to interpret all this data.

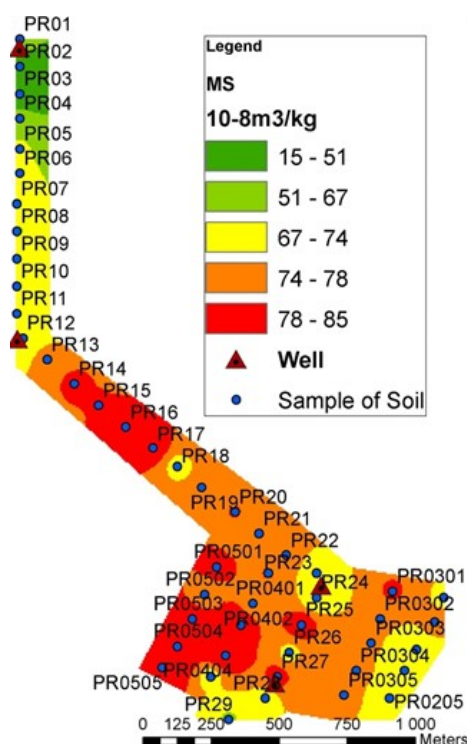


Fig. 1. Study site and the map of the spatial magnetic susceptibility distribution

Results and Discussion.

The thermomagnetic analyzes, hysteresis parameters, and IRM curves were studied for the samples collected near the well (point PR 28) and at the area located out of the hydrocarbon influence zone (point PR 0403).

We applied the thermomagnetic study of the remanent magnetization to identify magnetic phases, which are related to the natural soil magnetism or induced by the hydrocarbon migration (possibly halo effect). The data processing shows that after heating the sample to a temperature of 700 °C during cooling there is a slight decrease in the magnetization of the samples. There is a

decrease in magnetization at a temperature of about 580 °C, which indicates the presence of magnetite as the main magnetic mineral (Fig. 2). The remanent magnetization of the sample collected near well (Fig. 2a) is higher than for the sample collected at the background area (natural soil magnetism, Fig. 2b). The evidence of such kind of the behavior of the remanent magnetization may indicate the direct effect of migrating and microseepage as well as the halo hydrocarbon effect. At the same time at the point PR28 the maxima of gas geochemical parameters were registered.

Magnetite can be formed either by the oxidation of Fe^{2+} or by the regeneration of Fe^{3+} by magnetotactic bacteria (Lovley *et al.*, 1989). The magnetotactic bacteria reduce Fe (III) and are able to reduce higher crystalline Fe(III) minerals, such as hematite, goethite and magnetite, as well as poorly

crystallized ferrihydrite (Weber *et al.*, 2006). From the other site hydrocarbons in sediments and soils also affect Fe(II) oxidants as well as Fe(III) reducing agents. Sequentially, Fe^{2+} can be oxidized by anaerobic and aerobic Fe(II) oxidizing magnetotactic bacteria, which can also direct the formation of magnetite (Kappler and Straub, 2005). The mentioned processes can affect the change of ferromagnetic minerals and finally change the magnetic susceptibility of soil under the microseepage.

To go deeper inside the temperature dependence behavior of the magnetic minerals of the soil affected with hydrocarbon migration, we attracted the analyzes of the magnetic susceptibility for the sample PR28. The results are given in Fig. 3.

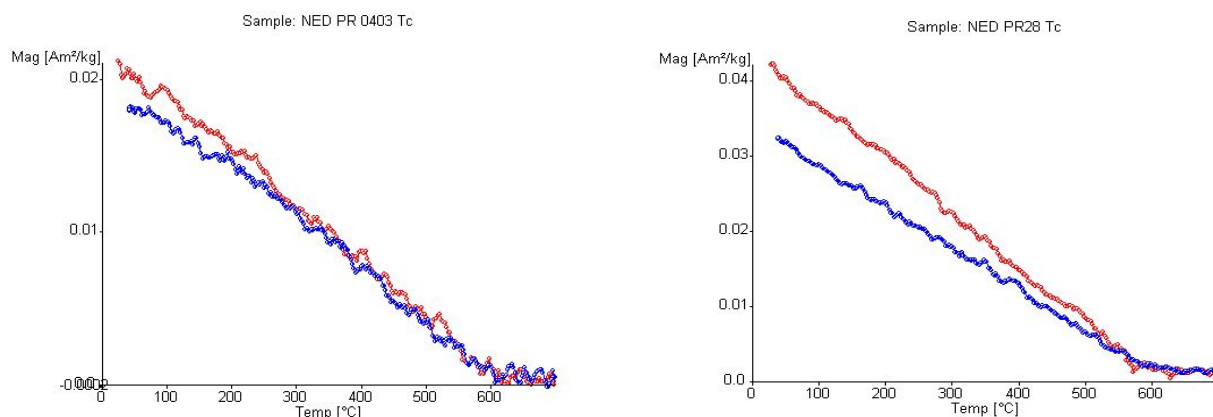


Fig. 2. Temperature dependence of the remanent magnetization:
a – the sample collected near well, b – sample collected at the background area

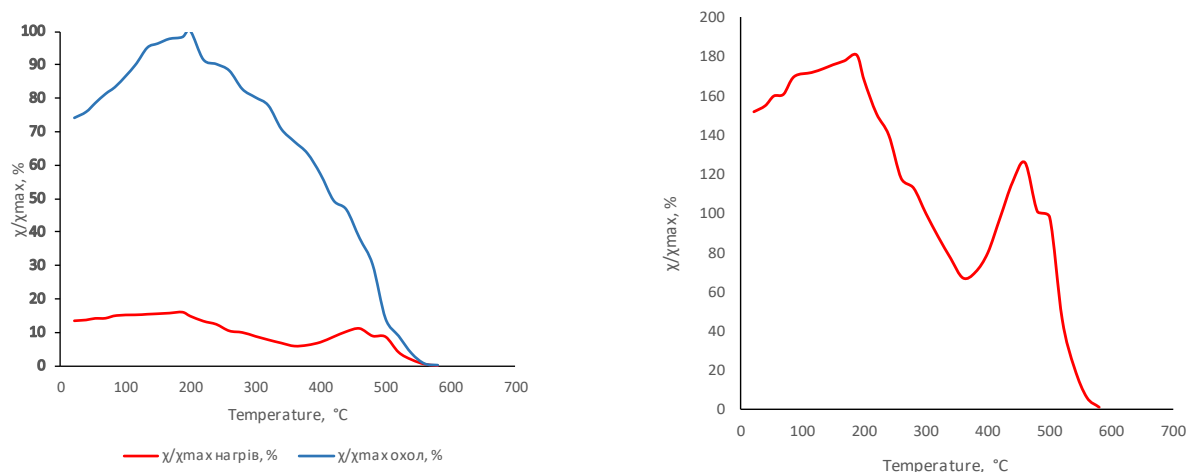


Fig. 3. The temperature dependence of the magnetic susceptibility for the sample collected at the hydrocarbon field near the well, point PR 25:
a – heating and cooling cycle; b – heating in more visible scale

The MS variations at temperatures ranging from 200 to 400 °C may reflect the presence of either iron sulphides or maghemite (Mathé and Lévêque, 2005). Alternatively, this variation might be due to fine particles staying in a single domain (SD) at room temperature and becoming superparamagnetic at increasing temperatures (Rijal *et al.*, 2012). The peak at 500 °C could indicate neoformation of magnetite. The latter must have resulted from oxidation of pyrite and other sulphides of hydrocarbon origin transformed into magnetite. The Curie temperature near 580 °C suggests the presence of magnetite-like phases. The heating curve (b),

however, shows no maximum near 500 °C indicating a much smaller content of magnetite. Variation within the temperature range of 200–400 °C, on the other hand, is associated with the main magnetic phases – sulphides or maghemites. The first peak at about 200 °C could be ascribed to the burning of organic matter, whereas a significant decrease in MS values near 400 °C could be related to the effect of maghemite-hematite transformation (Jordanova and Jordanova, 2016).

The hysteresis analyzes (Fig. 4) as well as studies of the backfield were applied for the samples PR 0403 and PR28 (see the description above).

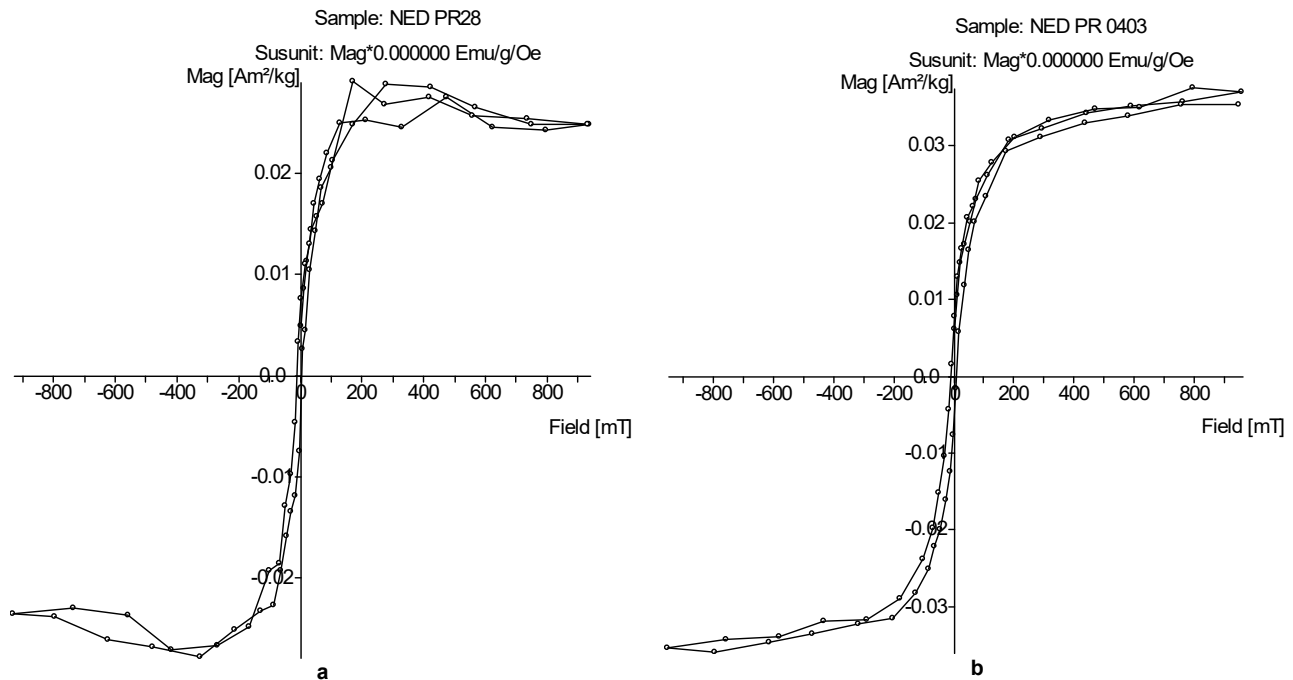


Fig. 4. The hysteresis loops:
a – the sample collected near well, b – sample collected at the background area

The smoothing of the paramagnetic effect was applied. For the sample collected at the point NED PR 0403 the hysteresis loop was obtained at 20 °C. The shape parameter is 0.32. This means the wasp-waisted geometry of the loop. The hysteresis ratios are: $M_{rs}/M_s=0.16$; $B_{cr}/B_c=2.99$; $B_{rh}/B_{cr}=1.86$ (where M_{rs} is remanent magnetization after saturation; M_s is magnetization at the saturation; B_{cr} is coercivity of remanence; B_c is coercivity; B_{rh} is hard component of the remanent magnetization). The coercivity curve was obtained at 22 °C. $B_{cr}=25.96$ mT. According to the mentioned values the magnetics are in the pseudo-single domain state (PSD).

For the sample collected at the point NED PR 28 the hysteresis loop was obtained at 23 °C. The shape parameter is 0.39. This means the wasp-waisted geometry of the loop. The hysteresis ratios are: $M_{rs}/M_s=0.20$; $B_{cr}/B_c=3.41$; $B_{rh}/B_{cr}=0.99$. The coercivity curve was obtained at 24 °C. $B_{cr}=24.89$ mT. According to the mentioned values the magnetics are in the pseudo-single domain state (PSD).

So-called "wasp-waisted" hysteresis loop is when the central section is smaller than the outer parts. Wasp-waisted loops are typically of mixed ensembles with contrasting coercivities: either a mixture of two magnetic minerals (for example magnetite and hematite) or a mixture of superparamagnetic and larger grains of the same mineral (Gubbins and Herrero-Bervera, 2007).

Conclusions.

Magnetic mineralogical studies provide the important data related to the identification of the magnetic phases according to the soil genesis. We studied soils at the areal of the hydrocarbon wells and under the natural pedogenesis. The remanent magnetization of the samples collected near the well was higher than for the samples collected at the background area. In this case the remanent magnetization indicates the direct effect of migrating and microseepage as well as the halo hydrocarbon effect. The results are confirmed by the highest values of the gas geochemical parameters. The MS variations at temperatures ranging from 200 to 400 °C may reflect the presence of either iron sulphides or

maghemite. The magnetite occurs for all soils. The wasp-waisted hysteresis loops identified either a mixture of two magnetic minerals (magnetite and hematite) and the admixture of the superparamagnetic and larger grains of the same minerals.

The magnetic mineralogical data considered as the complementary method at the complex of the direct hydrocarbon prospecting. Moreover, the natural soil magnetic parameters are important for the proper magnetometry interpretation of the low amplitude anomalies.

Acknowledgement. The studies were supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine, Grants ## 21БП049-01, 21БП049-02.

References

- Abdelazeem, M., Fathy, M. S., & Gobashy, M. (2021). Magnetometric Identification of Sub-basins for Hydrocarbon Potentialities in Qattara Ridge, North Western Desert, Egypt. *Pure and Applied Geophysics*, 178(3), 995–1020.
- Ayoubi, S., Samadi, M. J., Khademi, H., Shirvani, M., Gyasi-Agyei, Y. (2020). Using magnetic susceptibility for predicting hydrocarbon pollution levels in a petroleum refinery compound in Isfahan Province, Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 172, 103906.
- Badejo, S. A., Muxworthy, A. R., Fraser, A., Neumaier, M., Perkins, J. R., Stevenson, G. R., & Davey, R. (2021). Using magnetic techniques to calibrate hydrocarbon migration in petroleum systems modelling: a case study from the Lower Tertiary, UK Central North Sea. *Geophysical Journal International*, 227(1), 617–631.
- Costanzo-Álvarez, V., Rapalini, A. E., Aldana, M., Díaz, M., Kietzmann, D., Iglesia-Llanos, M. P., ... & Walther, A. M. (2019). A combined rock-magnetic and EPR study about the effects of hydrocarbon-related diagenesis on the magnetic signature of oil shales (Vaca Muerta formation, southwestern Argentina). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 861–879.
- De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Álvarez, V., Yépez, S., & Amon, C. (2021). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103036.
- Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*. Springer Science & Business Media.
- Jordanova, D., Jordanova, N., 2016. Thermomagnetic behavior of magnetic susceptibility – heating rate and sample size effects. *Front. Earth Sci.*, 3, 90.
- Kappler, A., & Straub, K. L. (2005). Geomicrobiological cycling of iron. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 59(1), 85–108.
- Kessouri, P., Ustra, A. (2019). On the use of magnetic properties to study soil hydrocarbon biodegradation. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, Vol. 2019, B53F-2463.

Lovley, D. R., Baedeker, M. J., Lonergan, D. J., Cozzarelli, I. M., Phillips, E. J., & Siegel, D. I. (1989). Oxidation of aromatic contaminants coupled to microbial iron reduction. *Nature*, 339(6222), 297–300.

Mathé, V., Lévêque, F. (2005). Trace magnetic minerals to detect redox boundaries and drainage effects in a marshland soil in western France. *European journal of soil science*, 56, 6, 737–751.

Menshov O., Kuderavets R., Popov S., Homenko R., Sukhorada A., Chobotok I. (2016). Thermomagnetic analyzes of soils from the hydrocarbon fields. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 2(73), 33–37.

Menshov, O. I. (2016). Magnetic method applying for the control of productive land degradation. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(4), 130–137.

Menshov, O. (2018). The role of magnetotactic bacteria in formation of natural magnetism of Ukraine soils. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 80(1), 40–45.

Menshov, O. (2021). The role of magnetic methods in the study of areas of the tight oil and gas: introduction. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 92(1), 42–49.

Sechman, H., Guzy, P., Kaszuba, P., Wojas, A., Machowski, G., Twaróg, A., & Maślanka, A. (2020). Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *International Journal of Earth Sciences*, 109(5), 1853–1867.

Rijal, M., Porsch, K., Appel, E., Kappler, A. (2012). Magnetic signature of hydrocarbon-contaminated soils and sediments at the former oil field Hünigsen, Germany. *Stud. Geophys. Geod.*, 56, 889–908.

Weber, K. A., Achenbach, L. A., & Coates, J. D. (2006). Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction. *Nature Reviews Microbiology*, 4(10), 752–764.

Список використаних джерел

Меньшов, О., Кудравець, Р., Попов, С., Хоменко, Р., Сухорада, А., Чоботок, І. (2016). Термоманітний аналіз ґрунтів територій покладів вуглеводнів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(73), 33–37.

Меньшов, О.І. (2016). Застосування магнітних методів для контролю змін продуктивних земель. *Геофізичний журнал*, 38(4), 130–137.

Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 80(1), 40–45.

Меньшов, О. (2021). Роль магнітних методів при дослідженні територій ущільнених порід-колекторів нафти і газу: постановка завдання. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 92(1), 42–49.

Abdelazeem, M., Fathy, M. S., & Gobashy, M. (2021). Magnetometric Identification of Sub-basins for Hydrocarbon Potentialities in Qattara Ridge, North Western Desert, Egypt. *Pure and Applied Geophysics*, 178(3), 995–1020.

Ayoubi, S., Samadi, M. J., Khademi, H., Shirvani, M., Gyasi-Agyei, Y. (2020). Using magnetic susceptibility for predicting hydrocarbon pollution levels in a petroleum refinery compound in Isfahan Province, Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 172, 103906.

Badejo, S. A., Muxworthy, A. R., Fraser, A., Neumaier, M., Perkins, J. R., Stevenson, G. R., & Davey, R. (2021). Using magnetic techniques to calibrate hydrocarbon migration in petroleum systems modelling: a case study from the Lower Tertiary, UK Central North Sea. *Geophysical Journal International*, 227(1), 617–631.

Costanzo-Álvarez, V., Rapalini, A. E., Aldana, M., Díaz, M., Kietzmann, D., Iglesia-Llanos, M. P., ... & Walther, A. M. (2019). A combined rock-magnetic and EPR study about the effects of hydrocarbon-related diagenesis on the magnetic signature of oil shales (Vaca Muerta formation, southwestern Argentina). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 861–879.

De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Álvarez, V., Yepez, S., & Amon, C. (2021). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103036.

Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. Springer Science & Business Media.

Jordanova, D., Jordanova, N., 2016. Thermomagnetic behavior of magnetic susceptibility – heating rate and sample size effects. *Front. Earth Sci.*, 3, 90.

Kappler, A., & Straub, K. L. (2005). Geomicrobiological cycling of iron. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 59(1), 85–108.

Kessouri, P., Ustra, A. (2019). On the use of magnetic properties to study soil hydrocarbon biodegradation. *In AGU Fall Meeting Abstracts*, Vol. 2019, B53F-2463.

Lovley, D. R., Baedeker, M. J., Lonergan, D. J., Cozzarelli, I. M., Phillips, E. J., & Siegel, D. I. (1989). Oxidation of aromatic contaminants coupled to microbial iron reduction. *Nature*, 339(6222), 297–300.

Mathé, V., Lévêque, F. (2005). Trace magnetic minerals to detect redox boundaries and drainage effects in a marshland soil in western France. *European journal of soil science*, 56, 6, 737–751.

Sechman, H., Guzy, P., Kaszuba, P., Wojas, A., Machowski, G., Twaróg, A., & Maślanka, A. (2020). Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *International Journal of Earth Sciences*, 109(5), 1853–1867.

Rijal, M., Porsch, K., Appel, E., Kappler, A. (2012). Magnetic signature of hydrocarbon-contaminated soils and sediments at the former oil field Hünigsen, Germany. *Stud. Geophys. Geod.*, 56, 889–908.

Weber, K. A., Achenbach, L. A., & Coates, J. D. (2006). Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction. *Nature Reviews Microbiology*, 4(10), 752–764.

Надійшла до редколегії 25.01.22

О. Меньшов, д-р геол. наук, ст. дослідник

E-mail: menshov.o@ukr.net,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

МАГНІТОМІНЕРАЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ҐРУНТІВ ЯК СКЛАДОВА КОМПЛЕКСНОЇ ГЕОЛОГО-ГЕОФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРИ ПОШУКАХ ВУГЛЕВОДНІВ

Магнітні мінерали утворюються або змінюються у присутності вуглеводнів, тому їх визначення дозволяє ідентифікувати шляхи міграції вуглеводнів. У пропонованій статті наведено високоточний магнітомінералогічний аналіз для розуміння, які магнітні мінерали в ґрунті з родовищ вуглеводнів відповідають за магнітний сигнал. Досліджено ділянку родовищ вуглеводнів поблизу с. Балабанівка Богодухівського району Харківської області. Колекція ґрунтових зразків представлена глибокими середньогумусними чорноземами. Термоманітні аналізи, параметри петлі гістерезису та криві ізотермічної залишкової намагніченості (IRM) були вивчені для проб, відібраних поблизу свердловини (точка PR 28), та на ділянці, розташованій поза зоною впливу вуглеводнів (точка PR 0403). Для дослідження термоманітних параметрів, різних типів намагніченості та магнітної сприйнятливості (MS, χ), а також петель гістерезису використовували прилад Variable Field Translation Balance (VFTB). Результати корелюються із високими значеннями геохімічних параметрів газів. Варіації MS при температурах від 200 до 400 °C можуть відображати присутність або сульфідів заліза, або магнетиту. Магнетит зустрічається у всіх ґрунтах. Петлі гістерезису, які нагадують осину стрічку (wasp-waisted), ідентифікували як суміш двох магнітних мінералів (магнетиту та гематиту), а також домішки суперпарамагнітних і крупніших зерен тих самих мінералів.

Ключові слова: ущільнені породи, нафта, газ, вуглеводні, ґрунти, магнетизм навколишнього середовища, магнітна сприйнятливість, намагніченість.

UDC 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.06>

R. Piriyeu,

E-mail: rahmanpiriyev@bsu.edu.az

ORCID: 0000-0002-1309-6692

Baku State University, Baku, Azerbaijan

PERIODICITY OF EARTHQUAKES IN THE CASPIAN SEA

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

The Caspian Sea is the largest closed reservoir in the world. The strongest earthquake in the Caspian Sea was the 7.9 magnitude, the 1895 Krasnovodsk earthquake. The parameters of earthquakes with different magnitude in recent years in the Caspian Sea were analyzed and the characteristic depth was determined based on statistical data. Attempts to determine their periodicity and attempts to predict for the future have been made on the basis of statistical data of earthquakes occurred within the last 50 years in the Caspian Sea and surrounding regions. In the data taken from the earthquake catalog, parameters of earthquakes whose magnitude is above 5.0 were used. In recent years, earthquakes with a magnitude below 5.0 have been accompanied in the Caspian Sea. The characteristic depth of earthquakes is considered ± 60 km. The probability of recurrence of an earthquake with a magnitude of 6.8 occurred in 2000 is likely to occur in 2050.

Keywords: Caspian Sea, earthquake, magnitude, depth, seismicity.

Introduction. The Caspian Sea is the largest closed reservoir in the world. The reason why earthquakes occur in the Caspian Sea is clear according to 3-D geodynamic model of the Caspian region after V.I. Ulomov (Fig. 1). The largest of the "coastal" seismic events known to have occurred there include 1895 Krasnovodsk, western Turkmenia magnitude 7.9 earthquake and the 1868 magnitude 7.8 event which occurred on the opposite coast of the Caspian Sea (Ulomov et al., 2003). The Caspian Sea

region presents earthquakes with a variety of focal mechanisms including lateral faulting, large and small angle thrusting and also normal faulting, all of which have the potential to be affected by crustal flexure (Fig. 2) (Ansari et al., 2020). Fig. 3 and Fig. 4 illustrates epicenters of earthquakes occurred different years in the Caspian Sea region. Let's try to determine the periodicity of earthquakes by paying attention to the time of occurrence, the magnitude, using statistical data.

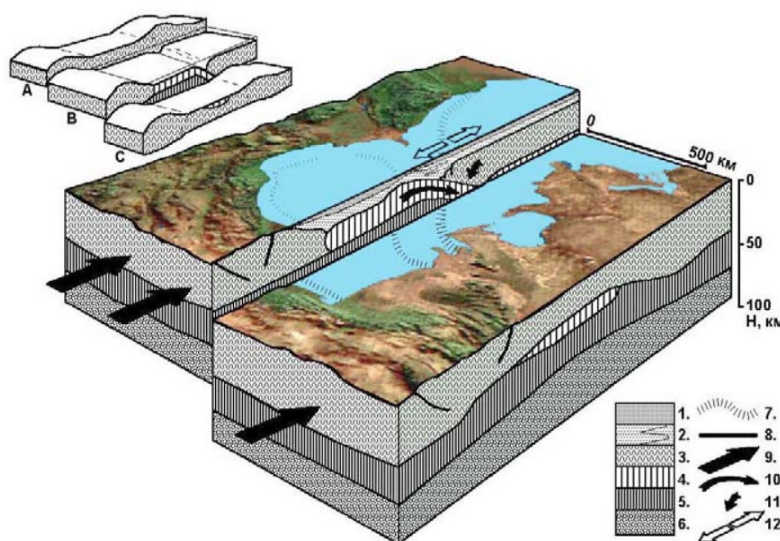


Fig. 1. 3-D geodynamic model of the Caspian region (after V.I. Ulomov).

Bottom: 1 – water layer; 2 – folded and faulted seafloor sediments; 3 – "granitic" layer; 4 – relicts of oceanic crust; 5 – "basaltic" layer; 6 – subcrustal substratum; 7 – highs in the gradient of isostatic anomalies; 8 – major tectonic faults; 9 – irection of pressure exerted by Arabian plate; 10 – direction of subduction for the southern Caspian oceanic lithosphere plugging under the Turanian-Scythian plate; 11 – direction of motion for the northern Caspian lithosphere as this is being involved into subduction; 12 – horizontal tension in the bending northern Caspian lithosphere producing normal slip movements in local earthquakes. Top-schematic dynamic three-block model:

A – Caucasus block, B – Albours Mountain – Caspian block, C – Kopet Dag – Turanian block (See Ulomov et al., 2003, fig. 3)

Materials and Methods. According to the official website (www.seismology.az) of the Azerbaijan Republic Seismic Survey Center, the periodicity of the earthquakes in the Caspian Sea was investigated using the catalogues of earthquakes from 01.01.2018 to 31.06.2021. During the analysis, parameters such as the moment of earthquakes, coordinates, depths, magnitudes were taken as the basis. On the basis of these materials, 4 graphs were drawn and these parameters were described in graphs. Each of the 4 graphs presents individual years. In the first graph describing 2018, earthquakes in the Caspian Sea were very few. This year the

region had a quiet period. The graph, which presents the earthquakes in 2019, clearly shows that it is characterized by greater activity in comparison with other years. If we look at 2020, we can see that the hypocenters are mainly in excess of 50 km in depth. In the first 6 months of 2021, we again see hypocenters deep within 50 km. Overall, if we take into account the earthquakes that occurred in these 4 years, we can see that earthquakes occurred mainly at a depth of ± 60 km. Over the years, the magnitude has been below 5.0 (Fig. 5, 6, 7 and 8).

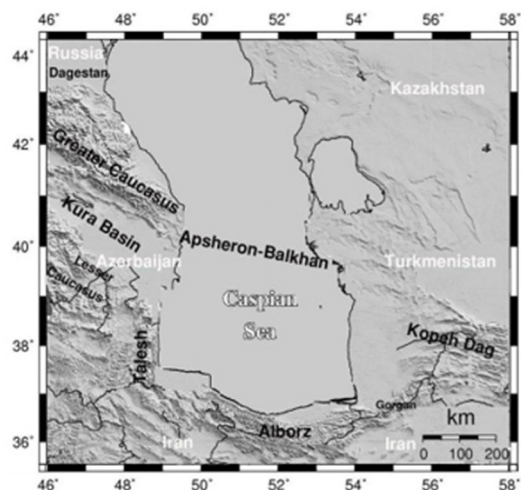


Fig. 2. The Caspian Sea surrounded by active seismic belts of earthquakes (after Jackson *et al.*, 2002)

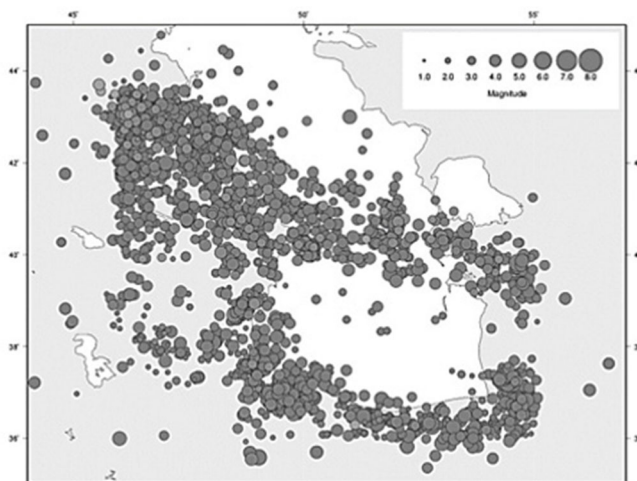


Fig. 3. Earthquake events occurred from 1931 to 2009 in the Caspian Sea region (Ansari *et al.*, 2020)

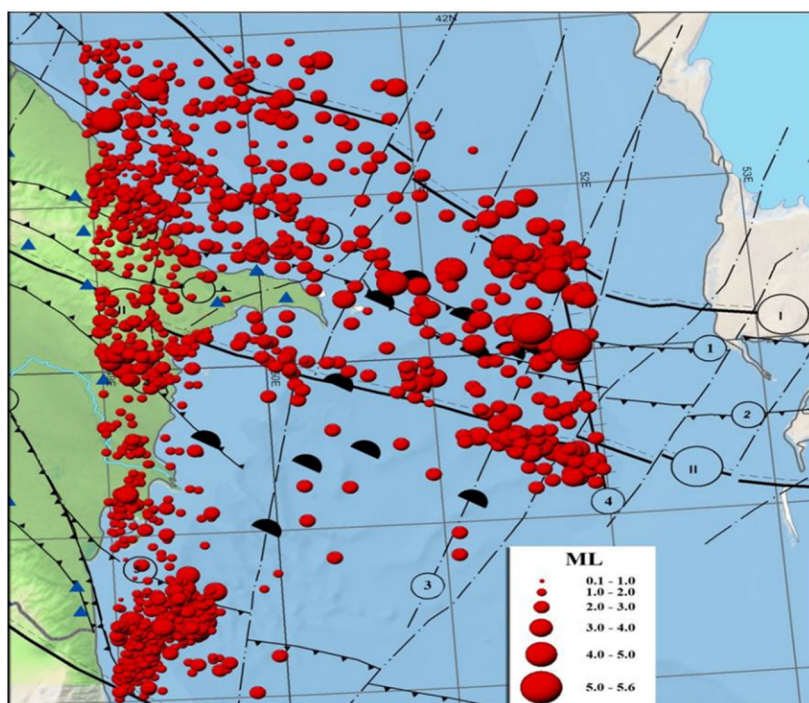


Fig. 4. Map of epicenters of earthquakes occurred in the Caspian Sea and nearby regions in 2014–2016 (Abdullayeva *et al.*, 2016)

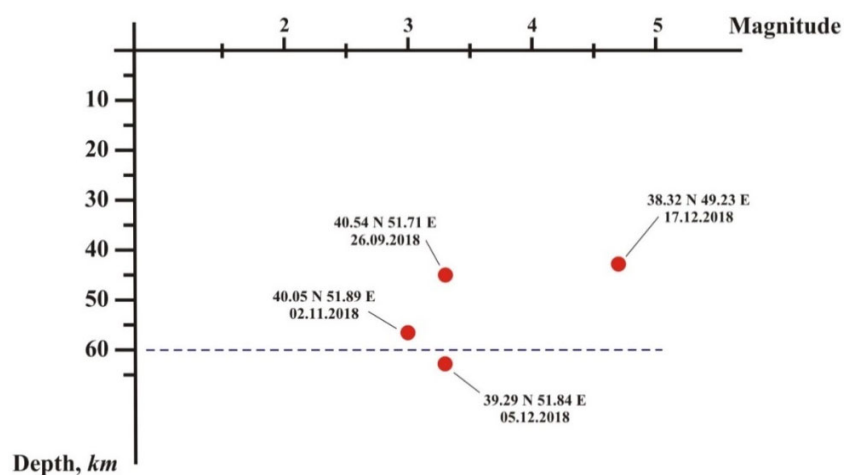


Fig. 5. Parameters of earthquakes in the Caspian Sea in 2018

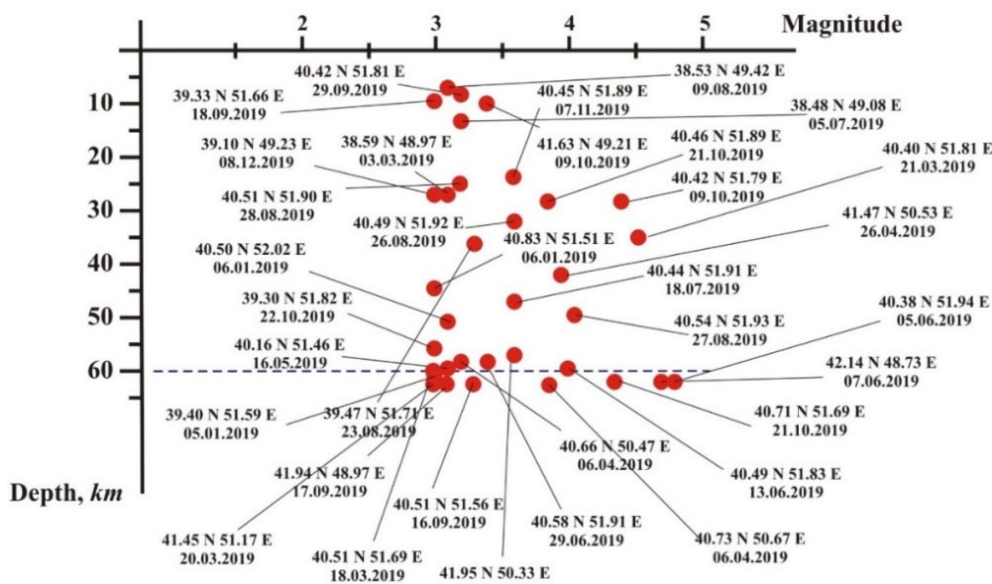


Fig. 6. Parameters of earthquakes in the Caspian Sea in 2019

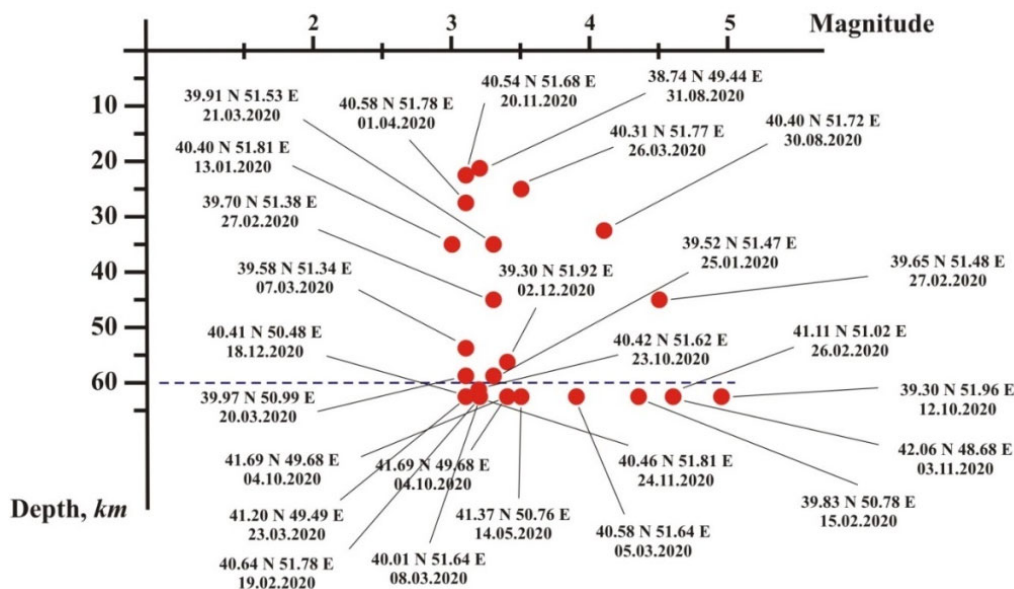


Fig. 7. Parameters of earthquakes in the Caspian Sea in 2020

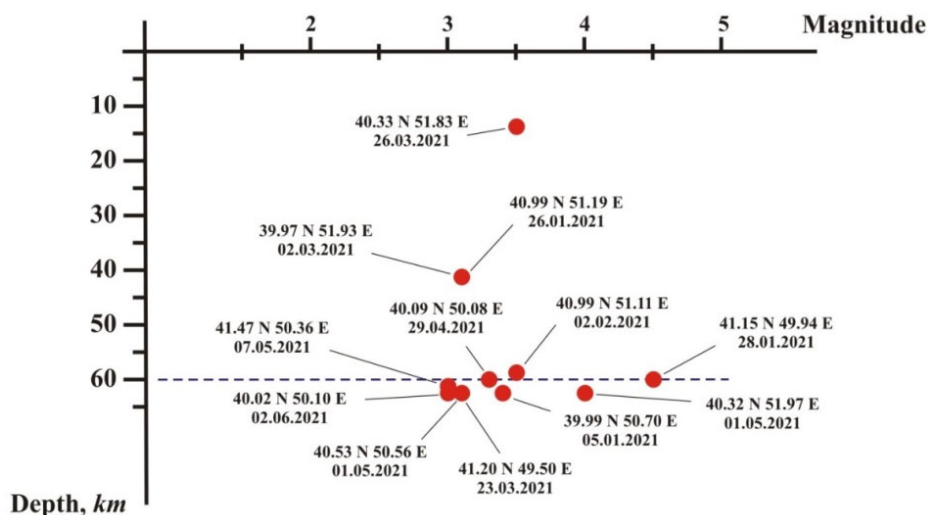


Fig. 8. Parameters of earthquakes in the Caspian Sea in 2021 (from 01 January to 31 June)

The table 1 below presents the earthquakes in the Caspian Sea and nearby regions. Let's pay attention to the 49 earthquake parameters given in the table. This table includes earthquakes with $M \geq 5.0$. In these earthquakes, we can see only one earthquake with the highest magnitudes. It is an earthquake that occurred in 2000 with a magnitude of 6.8. A total of 7 earthquakes close to the magnitude of this

earthquake have been observed since 1953. It also shows a repetition of several years of earthquakes with the same magnitude. Earthquakes of this type do not occur frequently in this region. But earthquakes with a magnitude of up to 5.0 frequently occur. If we pay attention to the depth of earthquakes, we can see that over the years the depth has been between 10–80 km.

Table 1

Parameters of earthquakes in the Caspian Sea and nearby areas, $M \geq 5.0$ (1953–2020) (www.earthquaketrack.com)

No	Earthquakes	Date	Location	Magnitude	Depth (km)
1.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	25.11.2000 18:09	Epicenter at 40.245, 49.946 15.2 km from Baku (Baki, Azerbaijan)	6.8	50
2.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	25.11.2000 18:10	Epicenter at 40.167, 49.954 23.2 km from Badamdar (Baki, Azerbaijan)	6.5	33
3.	Caspian Sea	16.09.1989 02:05	Epicenter at 40.337, 51.534 103.2 km from Pirallahı (Baki, Azerbaijan)	6.5	54
4.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	06.03.1986 00:05	Epicenter at 40.368, 51.555 105.2 km from Pirallahı (Baki, Azerbaijan)	6.5	33
5.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	17.09.1989 00:53	Epicenter at 40.203, 51.749 104.2 km from Türkmenbaşy (Balkan, Turkmenistan)	6.2	51
6.	Northwestern Iran	28.02.1997 12:57	Epicenter at 38.075, 48.05 24.2 km from Omidchah (Ardabil, Iran)	6.1	10
7.	Northwestern Iran	09.07.1998 14:19	Epicenter at 38.717, 48.507 10.2 km from Lerik (Lerik, Azerbaijan)	6.0	26
8.	Caspian Sea	20.04.1966 16:42	Epicenter at 41.703, 48.238 3.2 km from Gereykhanovskoye (Dagestan, Russia)	6.0	20
9.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	27.01.1963 19:35	Epicenter at 41.013, 49.732 30.2 km from Şuraabad (Xızı, Azerbaijan)	5.7	45
10.	Caspian Sea	21.03.1956 04:54	Epicenter at 40.932, 48.382 19.2 km from Basqal (İsmayilli, Azerbaijan)	5.7	15
11.	Caspian Sea	04.08.1981 18:35	Epicenter at 38.072, 49.34 48.2 km from Hashtpar (Gilan, Iran)	5.6	27
12.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	07.06.2014 06:05	Epicenter at 40.373, 51.574 106.2 km from Pirallahı (Baki, Azerbaijan)	5.5	30
13.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	10.02.2014 12:06	Epicenter at 40.288, 48.803 21.2 km from Mughan (Hacıqabul, Azerbaijan)	5.4	64
14.	Caspian Sea	07.10.2012 11:42	Epicenter at 40.747, 48.437 3.2 km from Basqal (İsmayilli, Azerbaijan)	5.4	17
15.	Northwestern Iran	03.01.1996 08:42	Epicenter at 38.994, 48.72 6.2 km from Masally (Masally, Azerbaijan)	5.4	56
16.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	18.09.1961 11:01	Epicenter at 40.974, 50.107 45.2 km from Bilajer (Baki, Azerbaijan)	5.4	53
17.	Caspian Sea	30.04.1953 15:45	Epicenter at 41.13, 48.129 28.2 km from Qutqashen (Qəbələ, Azerbaijan)	5.4	15
18.	Caspian Sea	01.08.2016 04:46	Epicenter at 40.07, 48.069 22.2 km from İmişli (İmişli, Azerbaijan)	5.3	10
19.	Caspian Sea	29.09.2014 01:38	Epicenter at 41.197, 48.1 24.2 km from Kurush (Dagestan, Russia)	5.3	13
20.	Northwestern Iran	27.01.1986 16:35	Epicenter at 38.885, 48.62 9.2 km from Boradigah (Masally, Azerbaijan)	5.3	71
21.	Caspian Sea	13.08.1959 00:33	Epicenter at 39.786, 48.4 10.2 km from Əhmədbəyli (Saatlı, Azerbaijan)	5.3	35
22.	Northwestern Iran	11.07.2007 06:51	Epicenter at 38.751, 48.598 14.2 km from Haftoni (Lənkəran, Azerbaijan)	5.2	25
23.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	07.01.2001 06:49	Epicenter at 40.171, 50.143 22.2 km from Türkan (Baki, Azerbaijan)	5.2	33
24.	Caspian Sea	21.03.2000 14:07	Epicenter at 39.949, 48.23 12.2 km from Saatlı (Saatlı, Azerbaijan)	5.2	59
25.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	07.05.1997 16:16	Epicenter at 40.338, 51.633 112.2 km from Pirallahı (Baki, Azerbaijan)	5.2	50
26.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	24.08.1989 18:55	Epicenter at 41.687, 49.273 46.2 km from Xaçmaz (Xaçmaz, Azerbaijan)	5.2	33
27.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	11.06.1986 20:15	Epicenter at 40.245, 51.665 112.2 km from Türkmenbaşy (Balkan, Turkmenistan)	5.2	47
28.	Caspian Sea	03.02.1976 16:40	Epicenter at 39.933, 48.415 3.2 km from Saatlı (Saatlı, Azerbaijan)	5.2	58
29.	Caspian Sea	05.02.2019 19:31	Epicenter at 40.933, 48.624 26.2 km from Basqal (İsmayilli, Azerbaijan)	5.1	10
30.	Caspian Sea	11.05.2017 03:24	Epicenter at 39.865, 48.602 17.2 km from Əhmədbəyli (Saatlı, Azerbaijan)	5.1	62

№	Earthquakes	Date	Location	Magnitude	Depth (km)
31.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	12.11.1990 16:00	Epicenter at 40.254, 51.621 112.2 km from Pirallahı (Baki, Azerbaijan)	5.1	53
32.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	17.09.1989 09:39	Epicenter at 40.259, 51.652 114.2 km from Türkmenbaşy (Balkan, Turkmenistan)	5.1	33
33.	Caspian Sea	02.12.1981 00:51	Epicenter at 40.926, 48.09 16.2 km from İsmayilli (İsmayilli, Azerbaijan)	5.1	33
34.	Caspian Sea	29.11.1981 23:37	Epicenter at 40.836, 48.078 8.2 km from İsmayilli (İsmayilli, Azerbaijan)	5.1	44
35.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	07.02.1976 03:38	Epicenter at 40.345, 51.12 68.2 km from Pirallahı (Baki, Azerbaijan)	5.1	80
36.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	14.12.1973 09:11	Epicenter at 41.876, 49.028 39.2 km from Xudat (Xaçmaz, Azerbaijan)	5.1	79
37.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	28.08.2018 12:57	Epicenter at 38.834, 48.857 8.2 km from Lankaran (Lankaran, Azerbaijan)	5.0	10
38.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	26.01.2015 03:30	Epicenter at 41.292, 48.875 13.2 km from Divichibazar (Shabran, Azerbaijan)	5.0	50
39.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	11.02.2002 16:18	Epicenter at 40.102, 50.211 29.2 km from Türkan (Baki, Azerbaijan)	5.0	54
40.	Caspian Sea	05.06.2001 15:33	Epicenter at 42.472, 48.634 53.2 km from Derbent (Dagestan, Russia)	5.0	60
41.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	29.11.2000 10:44	Epicenter at 39.856, 50.209 56.2 km from Türkan (Baki, Azerbaijan)	5.0	33
42.	Northwestern Iran	02.11.1994 12:31	Epicenter at 38.152, 48.315 11.2 km from Ardabil (Ardabil, Iran)	5.0	10
43.	Caspian Sea	21.05.1991 17:37	Epicenter at 42.867, 48.028 30.2 km from Manaskent (Dagestan, Russia)	5.0	10
44.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	17.09.1989 01:21	Epicenter at 40.243, 51.694 110.2 km from Türkmenbaşy (Balkan, Turkmenistan)	5.0	53
45.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	11.06.1986 12:41	Epicenter at 40.302, 51.673 113.2 km from Türkmenbaşy (Balkan, Turkmenistan)	5.0	33
46.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	01.05.1986 03:31	Epicenter at 40.242, 51.657 113.2 km from Türkmenbaşy (Balkan, Turkmenistan)	5.0	48
47.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	23.03.1986 14:26	Epicenter at 40.346, 51.629 111.2 km from Pirallahı (Baki, Azerbaijan)	5.0	33
48.	Caspian Sea, Offshore Turkmenistan	07.03.1986 02:21	Epicenter at 40.366, 51.559 105.2 km from Pirallahı (Baki, Azerbaijan)	5.0	40
49.	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan	19.11.1981 14:10	Epicenter at 40.734, 49.193 19.2 km from Kilyazi (Xızı, Azerbaijan)	5.0	33

To see earthquakes in more detail, Fig. 9 and Fig. 10 come to our aid. Fig. 9 shows that the last 20 years have been accompanied by relatively still periods. During the years of 1980–2000, there was a noticeable activity. This resulted in the occurrence of the highest magnitude earthquake ($M=6.8$) in 2000. Fig. 10 shows that over the past 20 years, earthquakes below magnitude 6.0 have been

observed. This can be explained by the fact that after the earthquake in 2000, there was a sufficient discharge of energy. If we look at the preparation process of the earthquake in 2000 based on these data, we can say that the probability of an earthquake with this magnitude or an earthquake with a magnitude above it is not expected in the coming years.

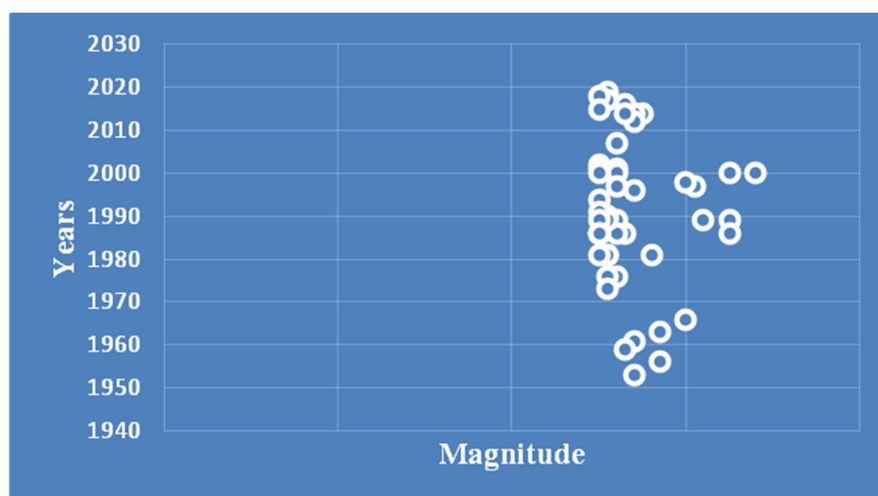


Fig. 9. Description of earthquakes with magnitude above 5.0 in the Caspian Sea and nearby areas over the years of 1953–2020

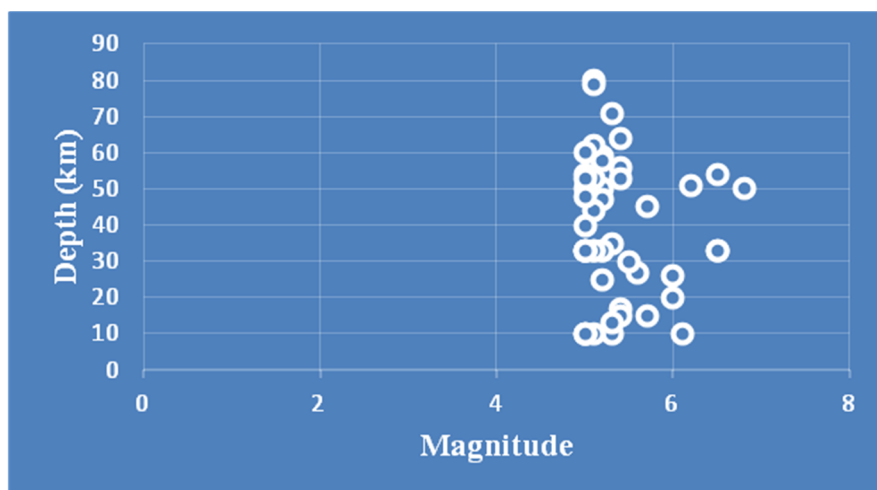


Fig. 10. Distribution of earthquakes over 5 magnitude by depth in the Caspian Sea and nearby areas during 1953–2020

Results and discussion. The periodicity of the earthquakes in the Caspian Sea in 2018–2021 was considered. 2018 was observed with relatively quiet seismicity. 2019 was accompanied by more earthquakes than in previous years. But over the years, earthquakes above magnitude 5.0 did not occur. The highest magnitude was 4.7 in 2018, 4.8 in 2019, 4.9 in 2020, and 4.5 in the first 6 months of 2021. Earthquakes in 2018–2021 covered a depth of up to 62 km. The main characteristic depth was determined ± 60 km. So, earthquakes at this depth occurred more often. The analysis of the statistical data of $M \geq 5.0$ earthquakes in the Caspian Sea and nearby areas since 1953 showed that the maximum depth of the earthquakes was 80 km, and the minimum depth was 10 km. In addition, the maximum magnitude was 6.8, which was an earthquake that occurred on 25.11.2000 at a depth close to the

characteristic depth I mentioned above, at a distance of 15.2 km from Baku.

Conclusion. If we try to predict earthquakes for the future, we can express our opinion using the help of the graph below (Fig. 11). So, if we mark the increase trajectory of earthquakes in the last 50 years with a red line, we can mark the trajectory with a yellow line in the next 50 years, considering the repetition of the same trajectory. Thus, the probability of an earthquake with a magnitude close to 7.0 is likely to be in 2050. This can be explained by the fact that in order for highest magnitude earthquake to occur, the process of higher energy discharge must take place. This means that the highest energy discharge occurred in the Caspian earthquake in 2000. After that, for the reoccurrence of such an earthquake, a lot of energy is necessary to be collected. The process of energy collection has been going on and on since 2000 till now. I hope our probability will not come true.

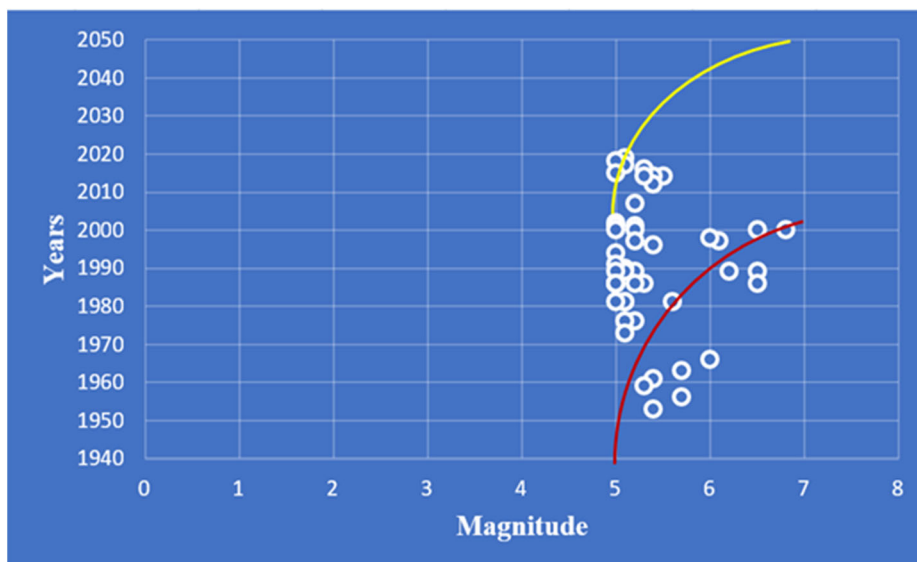


Fig. 11. Trajectory of earthquakes in the Caspian Sea (indicated by red line) and probable trajectory (indicated by yellow line)

References

- Abdullayeva, R.R., Kazimova, S.E., Ismayilova, S.S., Akbarov, E.R. (2016). Geodynamics of Azerbaijan part of the Caspian Sea. *Seismoprog. Observ. Territ. Azerb.*, 13, 1, 16–22.
Ansari, B., Firoofar, A., Bromhead, E.N. (2020). Seismicity and Water Level change in the Caspian Sea, an Explicit Function Based on Genetic Algorithm.

Cur Trends Civil & Struct Eng., 4(5). CTCSE.MS.ID.000597. DOI: 10.33552/CTCSE.2020.04.000597.

Jackson, J.A., Priestley, K., Allen, M., & Berberian M. (2002). Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International*, 148, 214–245.

Надійшла до редколегії 10.01.22

Р. Пірієв,
E-mail: rahmanpiriyev@bsu.edu.az
ORCID: 0000-0002-1309-6692
Бакинський державний університет, Баку, Азербайджан

ПЕРІОДИЧНІСТЬ ЗЕМЛЕТРУСІВ У КАСПІЙСЬКОМУ МОРІ

Каспійське море є найбільшим закритим резервуаром у світі. Найсильнішим землетрусом у цьому районі був Красноводський землетрус 1895 магнітудою 7,9. Проаналізовано параметри землетрусів у Каспійському морі різної магнітуди за останні роки, на основі статистичних даних визначено характерну глибину. Спроби визначити їх періодичність та спрогнозувати їхню появу робилися на основі статистичних даних про землетруси, що сталися за останні 50 років у Каспійському морі та найближчих регіонах. У даних, узятих із каталогів землетрусів, використовувалися параметри землетрусів магнітудою вище 5,0. В останні роки в Каспійському морі зафіксовано землетруси магнітудою нижче 5,0. Характерна глибина землетрусів становить ± 60 км. Імовірність повторення землетрусу магнітудою 6,8, що стався 2000 року, досить висока у 2050 році.

Ключові слова: Каспійське море, землетрус, магнітуда, глибина, сейсмічність.

УДК 550.312

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.07>Л. Шумлянська, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: lashum@ukr.net;П. Пігулевський, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,
Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 32, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІНОМІАЛЬНИХ ПОПРАВОК ДЛЯ ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНОЇ ОДНОВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ГУСТИНИ МАНТІЇ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. І. М. Корчагіним)

Наведено результати побудови оптимальної одновимірної моделі густини на прикладі швидкісної кривої для одного з мантийних доменів під Українським щитом. Дослідження розподілу густини проводили на основі трансформування першого наближення, отриманого за рівнянням Адамса – Уільямсона. Показано кілька варіантів трансформації: на основі середньоарифметичної поправки за п'ятьма референтними моделями мантиї (PEMC, PEMA, PREM, AK135, IASP91); з використанням опорних точок, що відображують сейсмічні границі, для визначення інтервалів обчислення густини за рівнянням Адамса – Уільямсона; при введенні поправок у вигляді різниці поліномів для теоретичної кривої густини та кривої, отриманої за рівнянням Адамса – Уільямсона для моделі IASP91. Розрахована останнім способом крива густини не привносить у модель IASP91 локальні (помилкові) аномалії густини і дотримується розташування сейсмічних границь, визначених за перегинами кривої Р-швидкості. При цьому крива густини, отримана з рівняння Адамса – Уільямсона, трансформується в криву, максимально наближену до середньоарифметичної кривої густини, при збереженні геометрії, властивості кривій сейсмічної швидкості Р- і S-хвиль.

Значення густини, отримані з використанням різниці поліномів, вважаємо оптимальним наближенням до фізичного розподілу густини для мантиї для зазначеного розподілу сейсмічних швидкостей, у нашому випадку – для мантийного домену під Українським щитом із координатами центра 28,25E 49N.

Ключові слова: густина, мантия, рівняння Адамса – Уільямсона, коригувальні поліноми.

Вступ. Густина – це один із основних фізичних параметрів, який цікавить дослідників внутрішньої будови Землі. Одна із класичних робіт, присвячена проблемам визначення густини в мантиї, була написана К. Е. Булленом ще у 70-ті роки минулого сторіччя (Буллен, 1978). З того часу підходи щодо розв'язання проблеми визначення густини в мантиї у масштабах Землі значно не змінилися. Далі ми стисло викладемо логічний ланцюжок отримання формули для визначення густини в мантиї для одновимірної моделі, здебільшого опираючись на цю роботу.

Відповідно до відомих співвідношень, які випливають ще з фізики Ньютона, головним залишається закон всесвітнього тяжіння:

$$g = G \frac{M}{R_E^2},$$

де g – прискорення вільного падіння, G – гравітаційна стала, M – маса Землі, R_E – її радіус, ρ – її густина.

З гідростатичного співвідношення $\frac{dP}{dz} = -\frac{dP}{dr} = g\rho$, випливає, що тиск зростає із глибиною, як у рідкому тілі, де $z = R_E - r$. Воно також надійне в межах ретельно встановлених обмежень для P – тиску. Ці три співвідношення дають одне з перших основних рівнянь, отримане Лапласом:

$$\frac{dP}{dr} = -4\pi G \rho r^{-2} \int_0^r \rho q^2 dq,$$

яке пов'язує радіус планети із густиною і тиском у її надрах. Тут q – радіус-вектор сферичного шару $0 < q \leq r$.

Моделний розподіл густини Землі має задовольняти інтегральні співвідношення, щоб відповідати насамперед масі та моменту інерції Землі. У першому наближенні Земля є кулею, тобто розглядається сферично-симетрична модель, де нехтують стисненням Землі та латеральними неоднорідностями такими, що $\rho = \rho(r)$. У цьому випадку маса, укладена у сферичну оболонку, становить $dm = 4\pi r^2 dr$.

Природно покласти ці параметри в основу побудови моделі густини Землі як функції $g(r)$, $m(r)$, $\rho(r)$ і $P(r)$.

Необхідно запровадити ще рівняння стану речовини Землі $P = P(V, T, \dots)$.

Оскільки тиск і температура за гідростатичної рівноваги залежать лише від радіуса, а $V = 4\pi r^3/3$, то рівняння стану можна переписати як залежність густини від тиску, температури тощо:

$$\rho = \rho(P, T, \dots).$$

Ці рівняння з урахуванням додаткових припущень про стан речовини були покладені згодом в основу досліджень залежності густини речовини планети – моделі Ендема, Роша, Дарвіна, Лежандра – Лапласа, Радо та ін. (Жарков, 2013; Магницкий 1965; Вікулін 2008).

У роботі ми спираємося на класичні уявлення про побудову сферично-симетричної моделі розподілу густини в мантиї Землі. Більш детально про побудову моделі, наближеної до реального середовища, поговоримо в розділі, присвяченому запропонованій методиці, оскільки подальший розгляд підходить відповідає конкретному розв'язанню поставленого завдання.

Мета. Побудова одновимірної моделі розподілу густини в мантиї, максимально наближеної до реального розподілу. Як вихідні дані використовується синтетична швидкісна крива для Р- та S-хвиль мантиї під північно-східною частиною Українського щита (УЩ) для домену з координатами центра 28,25E 49N, що отримана на основі сейсмотомографічної моделі (Шумлянська і др., 2014; Geyko, 2004).

Короткий аналіз методичних підходів. На першому етапі проаналізуємо кілька відомих із літератури методів, які не засновані на вищеприписаному підході визначення густини в мантиї.

Один із методів базується на лабораторних дослідженнях залежності швидкості хвиль стиснення в ізотропних агрегатах оксидів та силікатів від тиску. Ще в 1939 р. Берч дійшов висновку, що зміна густини для речовин з однаковою середньою атомною вагою відображає відмінності у структурі та складі. Берч також зазначав, що для такої речовини швидкість і густина можуть бути пов'язані багато в чому так само, як при зміні об'єму речовини тільки під впливом тиску (Birch, 1939, 1961, 1964).

Пізніше (McQueen et al., 1964) помітили, що для схожих матеріалів швидкість об'ємної звукової хвилі (сейсмічної) також пропорційна густині. Визначені Берчем

швидкості хвиль стиснення, повздовжні хвилі V_p , разом з визначеннями швидкостей поперечних хвиль V_s (Simmons, 1964), дають швидкість об'ємної звукової хвилі C , яка визначається як

$$C = (V_p^2 - 4/3 V_s^2)^{1/2}.$$

Це співвідношення було знайдено в результаті лабораторних вимірювань, воно також має іншу форму, виражену через лінійну залежність від густини:

$$C = a + b\rho,$$

де ρ – густина, a і b – коефіцієнти, що відображають функціональні залежності від атомної ваги речовини.

Для швидкостей об'ємних хвиль експериментальні співвідношення з густиною аналогічні:

$$V_p = a_p + b_p\rho; V_s = a_s + b_s\rho.$$

На (рис. 1) показані побудовані Берчем експериментальні залежності швидкості та густини за різних тисків для різних порід, використовуючи які можна розрахувати зміни густини в мантії безпосередньо за швидкісним розрізом.

Переваги підходу Берча полягають у простоті його використання. Основний недолік – це необхідність мати два апіорно задані параметри для пошуку третього: тиску та швидкості для оцінювання густини; густини та швидкості для оцінювання тиску. Це значне обмеження, яке дозволяє вийти із класу модельних завдань.

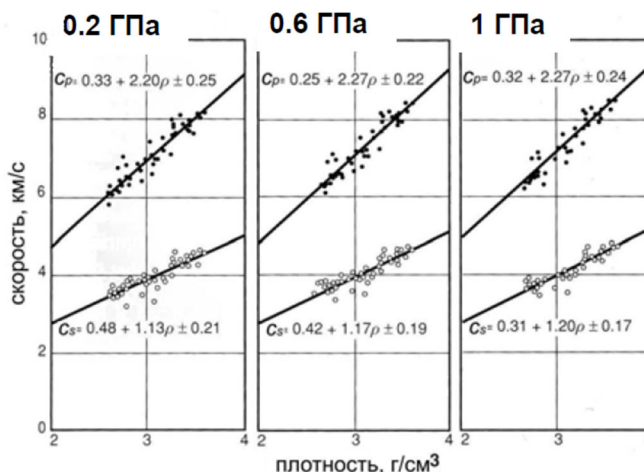


Рис. 1. Залежність швидкості об'ємних хвиль від густини за Берчем (Fowler, 2004)

Розглянемо ще один метод оцінювання стрибків густини на границях шарів мантії за співвідношенням енергії у відбитих та заломлених хвилях у шаруватому середовищі.

Розрахунок енергії об'ємних хвиль ведеться зазвичай за формулою, виведеною Цепритцем і Віхертом у 1912 р. (формула Цепритця – Віхерта) (Саваренский та ін., 1955).

$$E^{P,S} = 8\pi^3 R^2 c \rho \exp(kR) \frac{\sin \Delta \sin e_0}{de_0/d\Delta} \sum_n \frac{A^2}{T^2} t_e,$$

де R – відстань до епіцентру, k – коефіцієнт згасання, ρ – густина середовища, A – амплітуда сейсмічних хвиль, T – період сейсмічної хвилі, t_e – тривалість землетрусу. Експоненційний множник урахує загасання хвиль із відстанню внаслідок їх

розбіжності та розсіювання. Множник $\frac{\sin \Delta \sin e_0}{de_0/d\Delta}$ враховує геометричні особливості поширення хвиль та розходження сейсмічних променів, Δ – відстань у град., e_0 – кут виходу хвилі. На практиці сейсмічну енергію землетрусів зазвичай визначають за спеціальними номограмами (Fedotov, 1963), розрахованими за заданими параметрами середовища. Аналогічна номограма була розрахована для співвідношення енергії відбитої та заломленої хвилі (Tooley, 1965), яка залежить від співвідношення стрибка густини на границях шарів мантії та співвідношення сейсмічних швидкостей і кута падіння хвилі (рис. 2).

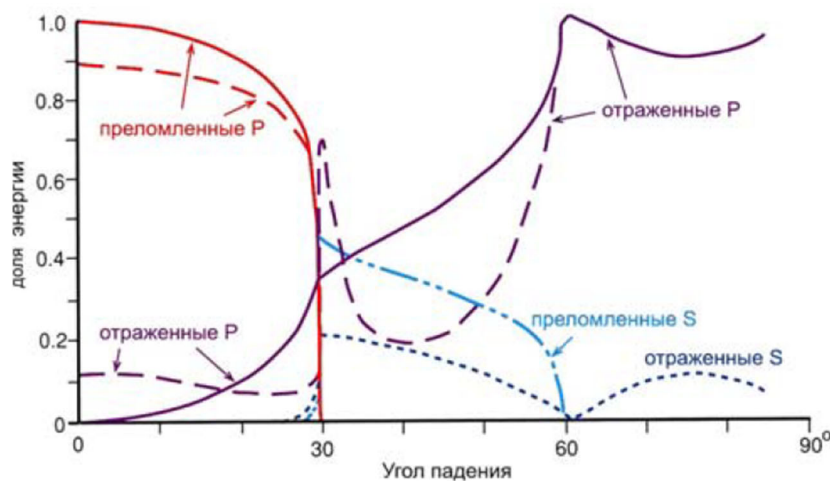


Рис. 2. Співвідношення енергії у відбитій та заломленій хвилях залежно від густин та кута падіння при $V_{p1}/V_{p2} = 0.5$; $V_{p1}/V_{s1} = 1.87$; $V_{p2}/V_{s2} = 1.73$ (суцільна лінія при $\rho_1/\rho_2 = 2$; пунктирна $\rho_1/\rho_2 = 2$) (Tooley, 1965)

Співвідношення амплітуд, швидкості та густини (Tooley, 1965):

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{\rho_2 V_{p,s2} - \rho_1 V_{p,s1}}{\rho_2 V_{p,s2} + \rho_1 V_{p,s1}},$$

$$\frac{A_2}{A_0} = \frac{2\rho_1 V_{p,s1}}{\rho_2 V_{p,s2} + \rho_1 V_{p,s1}},$$

де A_0 – амплітуда падаючої хвилі; A_1 – амплітуда відбитої хвилі; A_2 – амплітуда заломленої хвилі; $V_{p,s1}$ – швидкість поширення P - та S -хвиль у середовищі вище границі розділення; $V_{p,s2}$ – швидкість поширення P - та S -хвиль у середовищі нижче границі розділення; ρ_1 – густина у середовищі вище границі; ρ_2 – густина у середовищі нижче границі розділення.

Представлений метод оцінювання густини мантії, що спирається на виміри амплітуд сейсмічних хвиль, начебто зменшує залежність від вихідної (початкової) моделі, тобто дозволяє піти із класу модельних завдань, однак сама формула обчислення амплітуди Цепритца – Віхерта показує її залежність від густини. Фактично ми не просунулися на шляху пошуку розв'язання оцінювання густини поза класом завдання початкових моделей, що нас не влаштовує, оскільки ми шукаємо спосіб отримання густини без прив'язки до початкової моделі.

Повернемося до класичної постановки та підходів, розроблених для одновимірної сферично-симетричної моделі Землі. У вступі ми коротко розглянули теоретичні основи розподілу густини за заданої маси Землі, де нехтують стисненням Землі, латеральними неоднорідностями і неоднорідним складом порід, складових мантії.

Методики розрахунку густин із використанням сейсмічних швидкостей та їх верифікація. Рівняння Адамса – Уільямсона. Перший і найбільш істотний крок на шляху побудови моделей, наближених до реальних моделей Землі, зробили американські геофізики Адамс і Уільямсон у 1923 р. Як усі модельні задачі, їхній підхід має задані постулати: Земля має однорідний склад; нагнітання тиску в мантії Землі відбувається за гідростатичним законом – збільшення тиску Δp при збільшенні глибини на Δr дорівнює вазі речовини цього шару, що припадає на одиницю площі, тобто стисканню матеріалу під дією сил гравітації переважають переважно сили пружності. І тут справедливий закон Гука, який грає роль рівняння стану. Виходячи з цього, маємо:

$$dP = -K\theta,$$

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu,$$

$$\theta = \frac{dV}{V},$$

де K – модуль усебічного стиснення; θ – відносна зміна об'єму (дилатансія).

Сейсмічний параметр дозволяє масштабувати зміну густини та сили тяжіння відповідно до зміни швидкості об'ємної сейсмічної хвилі. Вважається, що цей підхід дозволяє визначити детальний розподіл густини в надрах Землі і, відповідно, побудувати реальну модель Землі. Однак, з урахуванням усіх заданих рипущень, коректніше вважати отриману модель квазіреальною. Роблячи далі підстановку

$$dP = -K \frac{dV}{V} = K \frac{dp}{\rho} = \frac{K}{\rho} dp$$

$$dP = F dp,$$

отримаємо рівняння Адамса – Уільямсона

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{g\rho}{F}$$

яке справедливе в тому випадку, коли густина збільшується із глибиною лише за рахунок ваги шарів, що лежать вище. $F = K/\rho = (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$ – сейсмічний параметр.

З урахуванням закону всесвітнього тяжіння та визначення маси, укладеної у сферичну оболонку, маємо

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dr} = -G \frac{\rho m(r)}{r^2} \\ \frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho \end{cases}$$

Різницева схема розв'язання системи рівнянь виглядає так (Захаров та ін., 2016):

$$\begin{cases} \rho(r - \Delta r) = \rho(r) - \Delta\rho = \rho(r) + G \frac{\rho(r)m(r)\Delta r}{r^2} \\ m(r - \Delta r) = m(r) - \Delta m = m(r) - 4\pi\rho(r)r^2\Delta r \end{cases}$$

Якщо при $r = R_E$ задано $\rho(R_E)$ і $m(R_E) = M$, то, послідовно "знімаючи" шари потужністю Δr , отримуємо значення $\rho(r)$ при $r < R_E$ і будуюмо розріз густини Землі (R_E – радіус Землі, M – маса Землі).

Наявність у Землі різких стрибків сейсмічних границь ставить під сумнів справедливості рівняння Адамса – Уільямсона, особливо на межі мантія – ядро, але в першому наближенні його застосування виправдане.

Квазі-3-вимірний сейсмотомографічний P -швидкісний модель мантії під УЩ (Шумлянська та ін., 2014), яка є набором одновимірних моделей, побудована за даними перших вступів рефрагованих P -хвиль. Фізика поширення рефрагованих хвиль передбачає їх плавне проходження крізь сейсмічні границі, на відміну від відбитих хвиль. Виходячи із цього, отримана в результаті інверсії годографа рефрагованих хвиль швидкісна крива є незмінною функцією, яка не має розривів першого роду – стрибків швидкості на границях. Відсутність різких стрибків створює умови для застосування рівняння Адамса – Уільямсона протягом усієї швидкісної кривої (до 2600 км), хоча і є обмеження для рівняння, пов'язані з неоднорідним складом мантії, які не враховує це рівняння.

Перерахунок синтетичної P -, S -швидкісної кривої (Shumlianska et al., 2021) із застосуванням рівняння Адамса – Уільямсона із супутніми постулатами і спрощеннями для густини був прийнятий нами як найбільш обґрунтований.

Методика визначення опорних (реперних) точок значень густини. У нашій роботі (Shumlianska et al., 2020) докладно описано метод отримання сейсмічних границь по перегибах перших похідних швидкісної кривої та наведено результати для мантії під УЩ. Ці дані можуть бути використані для визначення опорних точок (сейсмічних границь) для створення матриці реперних значень густини, узятих із точок, найбільше просторово близько розташованих до референтної моделі, що отримані із зіставлення швидкісних кривих – експериментальної та теоретичної (для референтної моделі). Для розрахунку швидкісної кривої для домену мантії, розташованого в північно-західній частині УЩ з координатами центра 28,25E 49N, узято референтну модель IASP9.

Ми пропонуємо таку схему розрахунку шуканої кривої густини:

- дані щодо глибин сейсмічних границь, що відповідають нашим координатам, розраховані у роботі (Shumlianska et al., 2020);
- за моделлю IASP91 для відповідних глибин визначаємо опорні значення густини, що відповідають сейсмічним границям;
- у межах між сейсмічними границями знаходимо густину за рівнянням Адамса – Уільямсона.

Методика побудови оптимальної моделі густини із внесеними поправками по поліномах. Побудуємо моделі густини за рівнянням Адамса – Уільямсона для референтних моделей Землі (PEMA, PEMC, PREM, IASP91, ak135). У рівнянні Адамса – Уільямсона використовується сейсмічний параметр, отриманий за швидкостями

об'ємних хвиль P , S . Розраховану криву апроксимуємо поліномами в межах стрибків густини (табл. 1). Також апроксимуємо криві теоретичних густин, побудовані за даними із сайту [https://ds.iris.edu/ds/products/emc-](https://ds.iris.edu/ds/products/emc-referencemodels/)

[referencemodels/](https://ds.iris.edu/ds/products/emc-referencemodels/). Поправку знаходимо як різницю поліномів для теоретичних кривих густин референтних моделей і отриманих за рівнянням Адамса – Уільямсона.

Таблиця 1

Поліноми для кривих густин референтних моделей, розрахованих за рівнянням Адамса – Уільямсона і літературними даними та їх різниця

Поправки для густини		Поліном для глибин 0-220 км	Поліном для глибин 220-420 км	Поліном для глибин 420-670 км		Поліном для глибин 670-2185 км	
PEMC	Експер.	$y = 0.001x + 3.2786$	$y = 0.0008x + 3.3285$	$y = 0.0008x + 3.3219$		$y = 1E-07x^2 + 0.0006x + 3.4197$	
	Теор.	$y = 0.0006x + 3.2983$	$y = 0.0006x + 3.298$	$y = 0.0012x + 3.2488$		$y = -3E-08x^2 + 0.0006x + 3.9656$	
	Різниця поліномів	Експер.-теор. $y = 0.0004x - 0.0197$	Експер.-теор. $y = 0.0002x + 0.0305$	Теор.-експер. $y = 0.0004x - 0.0731$		Теор.-експер. $y = -1.3E-07x^2 + 0.5459$	
PEMA	Експер.	$y = 0.0009x + 3.2828$	$y = 0.0008x + 3.3094$	$y = 0.0008x + 3.3259$		$y = 2E-07x^2 + 0.0006x + 3.343$	
	Теор.	$y = 0.0006x + 3.2982$	$y = 0.0006x + 3.2979$	$y = 0.0012x + 3.2485$		$y = -3E-08x^2 + 0.0006x + 3.9662$	
	Різниця поліномів	Експер.-теор. $y = 0.0003x - 0.0154$	Експер.-теор. $y = 0.0002x + 0.0115$	Теор.-експер. $y = 0.0004x - 0.0774$		Теор.-експер. $y = -2.3E-07x^2 + 0.6232$	
AK135		0-210 км	210-410 км	410-660 км		660-2740 км	
	Експер.	$y = 0.0009x + 3.2667$	$y = 0.0008x + 3.2843$	$y = 0.0008x + 3.2915$		$y = 2E-07x^2 + 0.00035x + 3.4352$	
	Теор.	$y = 5E-06x^2 - 0.0006x + 3.3153$	$y = 0.0014x + 3.1054$	$y = 0.0013x + 3.2755$		$y = -7E-08x^2 + 0.0007x + 3.9202$	
	Різниця поліномів	Експер.-теор. $y = -5E-06x^2 + 0.0015x - 0.0486$	Експер.-теор. $y = -0.0006x + 0.1789$	Теор.-експер. $y = 0.0005x - 0.016$		Теор.-експер. $y = -2.7E-07x^2 + 0.00035x + 0.485$	
PREM		0-220 км	220-400 км	400-600 км	600-670 км	670-770 км	770-2880 км
	Експер.	$y = 0.001x + 3.3283$	$y = 0.0008x + 3.3615$	$y = 0.0008x + 3.3739$	$y = 0.0008x + 3.373$	$y = 0.0006x + 3.5034$	$y = 2E-07x^2 + 0.0005x + 3.6451$
	Теор.	$y = -0.0001x + 3.3834$	$y = 0.0006x + 3.3041$	$y = 0.0013x + 3.2187$	$y = 0.0002x + 3.873$	$y = 0.0006x + 3.9632$	$y = -3E-08x^2 + 0.0009x + 3.9851$
	Різниця поліномів	Експер.-теор. $y = 0.0011x - 0.0551$	Експер.-теор. $y = 0.0002x + 0.0574$	Теор.-експер. $y = 0.0005x - 0.1552$	Теор.-експер. $y = -0.0006x + 0.5$	Теор.-експер. $y = 0.4598$	Теор.-експер. $y = -2.3E-07x^2 + 0.0003x + 0.34$
IASP91		50-100 км	150-175 км	200-275 км	300-640 км	640-2893 км	
	Експер.	$y = 0.0009x + 3.1668$	$y = 0.0009x + 3.1658$	$y = 0.0009x + 3.1664$	$y = 0.0009x + 3.1721$	$y = 2E-07x^2 + 0.0004x + 3.3857$	
	Теор.	$y = 0.0038x + 3.0106$	$y = 0.0005x + 3.3208$	$y = 0.0037x + 2.7646$	$y = 0.0008x + 3.5415$	$y = 0.0005x + 3.9431$	
	Різниця поліномів	Теор.-експер. $y = 0.0029x - 0.1562$	Теор.-експер. $y = -0.0004x + 0.155$	Теор.-експер. $y = 0.0028x - 0.4018$	Теор.-експер. $y = -0.0001x + 0.3694$	Теор.-експер. $y = -2E-07x^2 + 0.0001x + 0.5574$	

x – глибина (км); y – значення густини ($г/см^3$). Експер. – експериментальна крива густини, що отримана за рівнянням Адамса – Уільямсона; Теор. – крива густини для кожної моделі зі значеннями густини, що викладені на сайті IRIS (<https://ds.iris.edu/ds/products/emc-referencemodels/>).

Поправку для однієї з референтних моделей використуємо при наближенні до "реальної" моделі густини для вибраного нами домену мантиї під УЩ. Як і в попередньому випадку, будемо використовувати сейсмічні границі, у межах яких застосуємо поправки до полінома для значень густини референтної моделі IASP91.

Перевірка побудованої моделі. Тривимірність або навіть чотиричовимірність надр Землі не дозволяє точно їх описати за допомогою якогось одновимірного наближення, навіть обґрунтованого загальноприйнятими постулатами і законами фізики. Крім того, ми продовжуємо описувати реальну Землю за допомогою сферично-симетричних моделей. У нашій роботі ми проводимо тестування перерахунку синтетичних P - та S -швидкісних одновимірних моделей для густини на прикладі одновимірної моделі. Використана одновимірна швидкісна модель є складовою P -швидкісної сейсмотомографічної моделі мантиї під УЩ, отриманої за методом Геїко (Geyko, 2004), і доповнена синтетичною S -швидкісною моделлю (Shumlianska et al., 2021).

Перерахуємо за такою методикою значення густини для кривої, яка є середньоарифметичною від п'яти

відомих референтних швидкісних моделей мантиї Землі (PEMA, PEMC, PREM, IASP91, ak135). Визначимо відхилення кожної із цих моделей від розрахованої та порахуємо середньоарифметичне відхилення, щоб використовувати їх як поправки при перерахунку швидкісної кривої сейсмотомографічної моделі мантиї під УЩ. Цифрові дані про моделі взято на сайті IRIS (<https://ds.iris.edu/ds/products/emc-referencemodels/>).

Результати. Відповідно до формули різниці до підрахунку густини мантиї за рівнянням Адамса – Уільямсона (Zakharov et al., 2016) ми отримали розв'язки для п'яти референтних швидкісних моделей (PEMC, PEMA, PREM, AK135, IASP91) і однієї зі швидкісних кривих для P -хвиль, доповненої синтетичною для S -хвиль, узятою із квазітривимірної сейсмотомографічної моделі для мантиї під УЩ для домену з координатами центра 28,25 Е 49N, в інтервалі глибин 50–2600 км. Для інших моделей ми також обмежимося цією глибиною.

На рис. 3 представлено криві густини для референтних моделей у варіантах, узятих за даними на сайті <https://ds.iris.edu/ds/products/emc-referencemodels/>, і ті, що розраховані за рівнянням Адамса – Уільямсона.

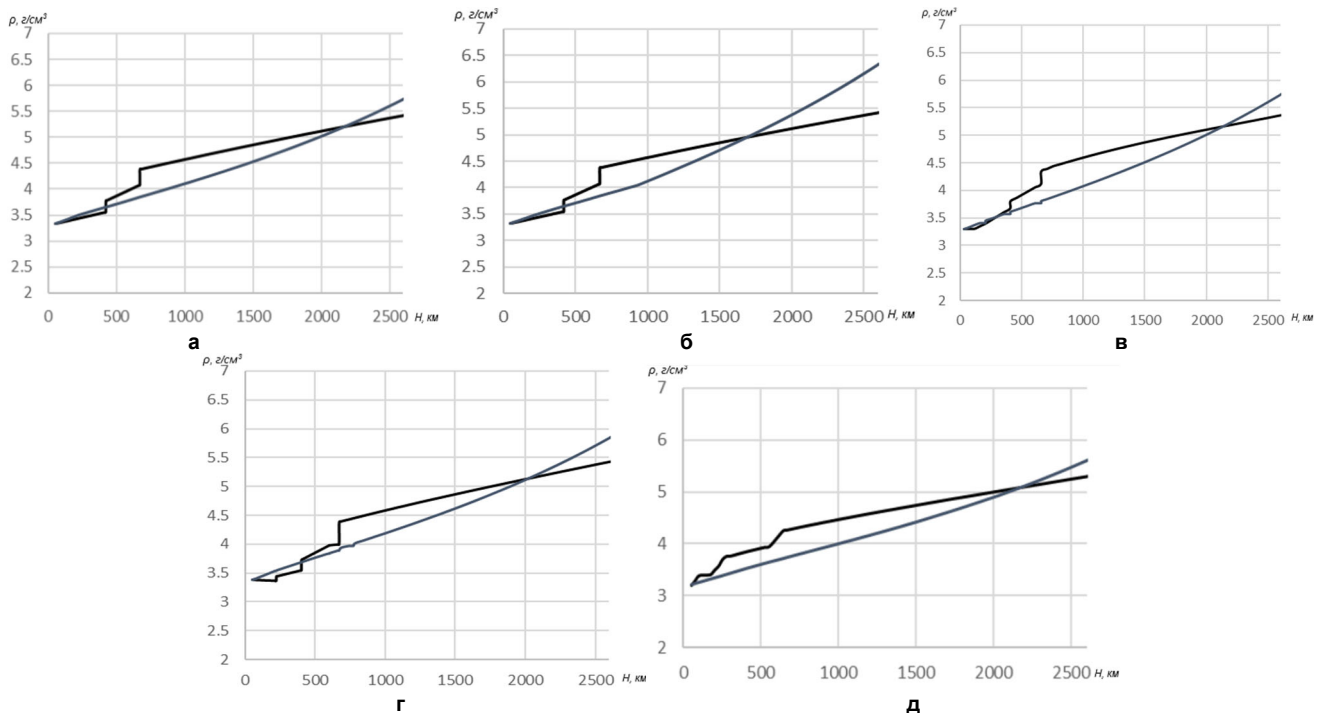


Рис. 3. Теоретичні та перераховані за рівнянням Адамса – Уільямсона криві густини для референтних моделей Землі: а – PEMC; б – PEMA; в – PREM; г – AK135; д – IASP91; теоретична модель – чорна лінія, розрахована за рівнянням Адамса – Уільямсона – сіра лінія

Різниця між кривими густини теоретичними і отриманими за рівнянням Адамса – Уільямсона показує недолік постулату про однорідність мантиї, а також припущення про створення тиску лише за рахунок вище залягаючих шарів. Для нівелювання цих відхилень ми пропонуємо запровадити поправки у вигляді різниці поліномів для теоретичних референтних кривих густини й отриманих у результаті перерахунку за рівнянням Адамса – Уільямсона.

На рис. 4,а показані криві густини, розраховані за рівнянням Адамса – Уільямсона для референтних моделей (кольорові лінії), і крива густини для домену мантиї під УЩ із координатами центра 28,25E 49N (чорна лінія). На рис. 4,б показані швидкісні криві для референтних моделей (кольорові лінії) та для кривої 28,25E 49N (чорна лінія). Крива для мантийного домену УЩ не має різких стрибків швидкості на сейсмічних границях.

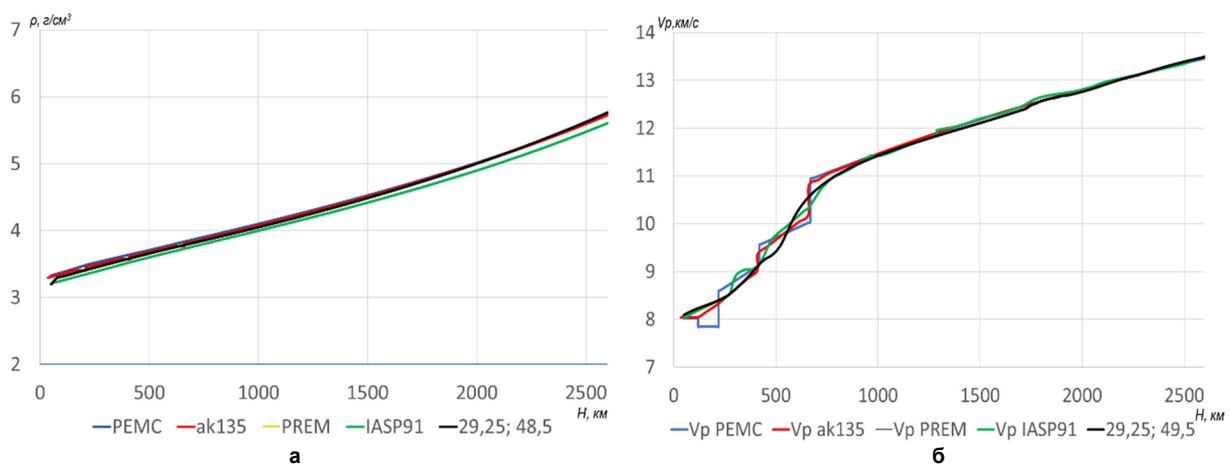


Рис. 4. Розміщення кривих густини, розрахованих за рівнянням Адамса – Уільямсона (а), та швидкості Р-хвиль (б) для домену мантиї з координатами центра 28,25E 49N щодо одновимірних референтних моделей (PEMC, PEMA, PREM, AK135, IASP91)

На рис. 5 показані криві густини для референтних моделей (кольорові лінії) та для кривої під УЩ у мантийному домені з координатами центра 28,25E 49N (чорна лінія) із введеними поправками для референтних моделей відповідно до різниці поліномів (табл. 1). Під щитом поправки становлять середнє арифметичне між поправками для референтних моделей. Бачимо, що перерахунок

швидкісних кривих за допомогою середньоарифметичних поправок теоретично може бути використаний, проте введення таких поправок призводить до спотворення (невідповідності) геометрії вихідної кривої (див. швидкісну криву на рис. 4,б), що, у свою чергу, може створювати локальні (помилкові) аномалії густини.

Застосовуючи інший підхід, можна визначити поправки у вигляді різниці поліномів для середньої кривої густини від референтної та пошукової моделей (табл. 2). Отримана крива густини, після внесення поправок за різницею поліномів (рис. 6), має розрив на межі 670 км, оскільки складно підібрати поліном, який описує верхню і нижню мантиї одночасно. Залишається нерозв'язаним питання про те, наскільки отримана крива відповідає оптимальній моделі мантиї, а також чи вносять поправки некоректні зміни в перераховану криву (наскільки вона відповідає початковим змінам сейсмічних швидкостей). Однак такий

підхід краще використовувати для побудови відносних моделей з опорною кривою, наприклад середньою для референтних або кривою для домену мантиї, а аномалії будуть показувати відхилення відносно опорної моделі.

Для мантийного домену з координатами центра 28.25E 49N маємо такі сейсмічні границі та відповідні до них значення густини за моделлю IASP91 (табл. 3). Ці значення густини були використані як опорні для відповідних границь, а у проміжках було застосовано середньоарифметичні поправки за референтними моделями (рис. 7).

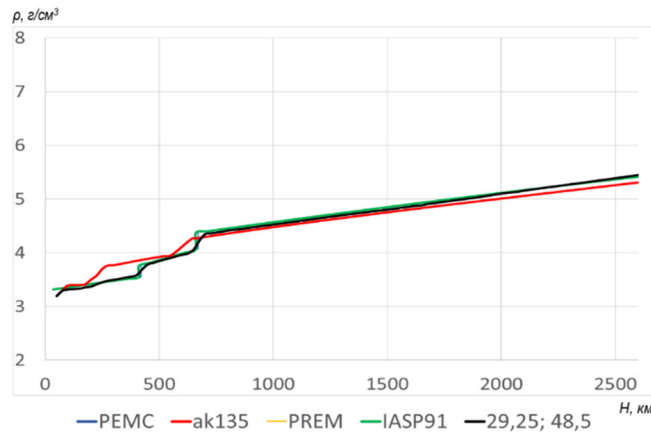


Рис. 5. Криві густини для референтних моделей (кольорові лінії) та для кривої у мантийному домені під УЩ із координатами центра 28,25E 49N (чорна лінія) із введеними поправками

Таблиця 2

Поліноми для середньої кривої густини, для шуканої кривої та їх різниці (значення x , y див. у табл. 1)

	Глибина 0-675 км	Глибина 700-2600 км
Поліном для середньої моделі	$y = 2E-06x^2 + 0.0006x + 3.291$	$y = 1E-08x^2 + 0.0005x + 3.8818$
Поліном для пошукової моделі	$y = -5E-07x^2 + 0.0004 + 3.2058$	$y = 1E-07x^2 + 0.0004x + 3.4347$
Різниця поліномів	$y = 2.5E-07x^2 - 0.0002x + 0.0126$	$y = -0.9E-07x^2 + 0.0001x + 0.4471$

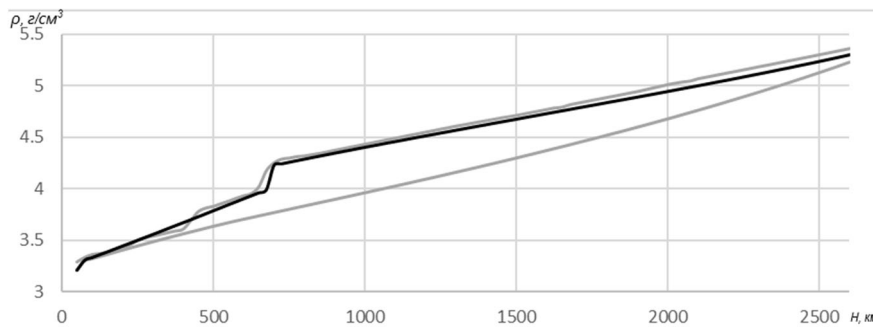


Рис. 6. Криві густини: для середньої від референтних моделей (сіра пунктирна лінія); для домену 28,25E 49N, розрахована за рівнянням Адамса – Уільямсона (сіра лінія); та сама крива із внесеними поправками за різницею поліномів (чорна лінія)

Таблиця 3

Значення глибин сейсмічних границь із відповідними значеннями густини

Глибина сейсмічної границі домена з координатами центра 28,25E 49N, км	Значення густини за моделлю IASP91, г/см³
135	3.39727
165	3.401584
290	3.765419
390	3.820897
425	3.867325
470	3.89995
515	3.93214
600	4.11500

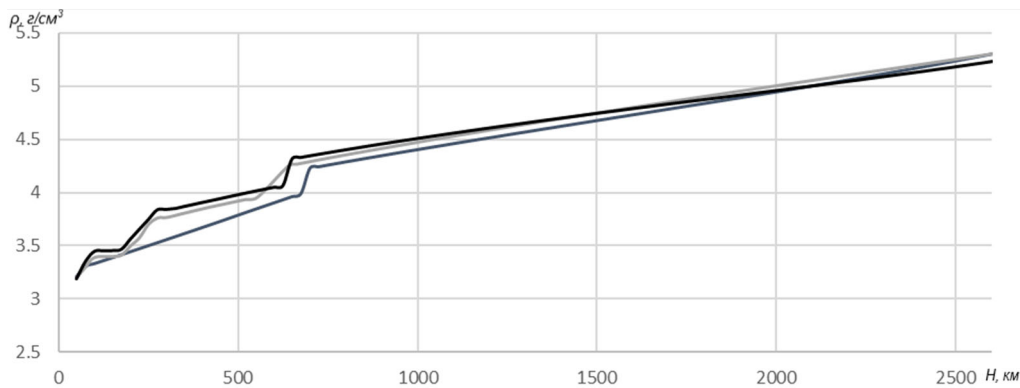


Рис. 7. Криві густини: для IASP91 (сіра пунктирна лінія); для мантійного домену з координатами 28,25E 49N із внесеними середньоарифметичними поправками за референтними моделями (темно-сіра лінія); та сама крива з опорними значеннями густини для сейсмічних границь (чорна лінія)

На рис. 8 показано результат використання поправочного полінома для референтної моделі IASP91 (табл. 1) щодо кривої густини для мантійного домену, що вивчається, порашованого за рівнянням Адамса – Уільямсона.

Поліноми були застосовані в інтервалах сейсмічних границь, визначених раніше за перегинами перших похідних кривої швидкості Р-хвиль.

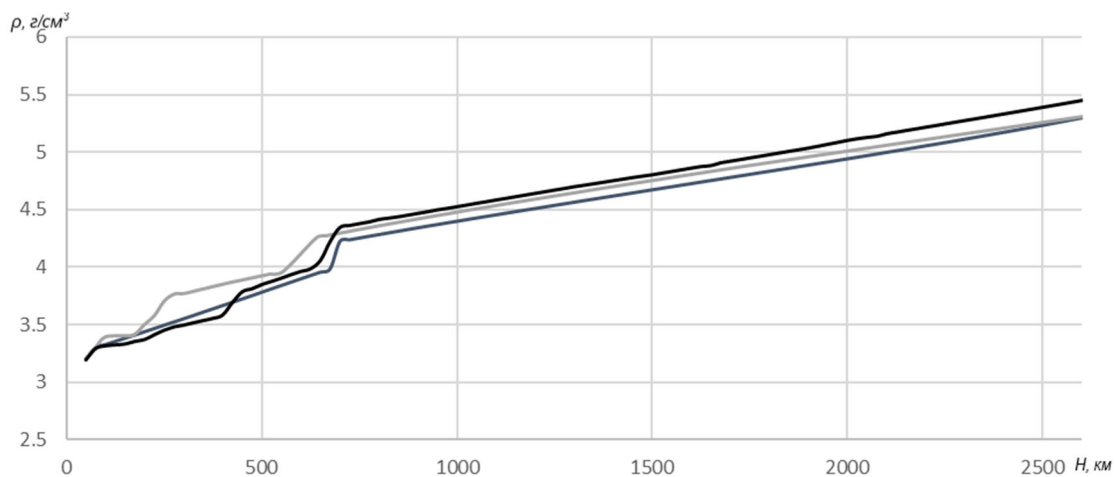


Рис. 8. Криві густини: для IASP91 (сіра пунктирна лінія); для мантійного домену з координатами 28,25E 49N із внесеними середньоарифметичними поправками за референтними моделями (темно-сіра лінія); для мантійного домену, розрахована за рівнянням Адамса – Уільямсона з поправками за різницевиими поліномами щодо густини моделі IASP91 (чорна лінія)

Обговорення. Розглянемо схему створення одновимірної моделі густини, описану в літературі та використану нами у цьому дослідженні:

- розрахунок моделей густини для мантії ведеться для одновимірного сферично-симетричного випадку; використовуємо припущення, що маса Землі є сталою для кожної моделі;

- не враховується хімічна та інші неоднорідності;
- тиск усередині надр створюється тільки за рахунок вищих шарів – вимога до рівняння Адамса – Уільямсона;
- сферична симетричність моделі спричинює те, що врахування реальних швидкостей, отриманих за сейсмічною томографією, створює нереальну ситуацію, коли один із розподілів швидкостей присвоюється всій сфері.

Ці обмеження дозволили нам отримати оптимальну модель густини для одного з доменів мантії під Українським щитом із координатами центра 28,25E 49N. Метод було описано вище, основа наших розрахунків – рівняння Адамса-Уільямсона.

Отриману криву густини ми спробували модифікувати (наблизити) до фізичної моделі шляхом введення поправок за відомими референтними моделями (PEMC, PEMA,

PREM, AK135, IASP91) як середньоарифметичну поправку за всіма моделями. Для цього кожна модель була перерахована для кривої густини за рівнянням Адамса – Уільямсона. За різницею між вихідними даними густини та літературними було визначено величину поправки. Проте, як видно з рис. 5, введення таких поправок призводить до псевдострибків густини, невлавливих первинній швидкісній кривій у точці 28,25E 49N (рис. 4,б).

Уведення поправок, як перших, так і других, показує, що спотворення початкової моделі поправками неминуче. У цих випадках можна уникнути некоректного розуміння аномалій густини, відображаючи їх у вигляді різниці початкової моделі та розрахованої. Така практика широко використовується в геофізиці.

Нами було апробовано інший спосіб запровадження поправок – у вигляді різниці поліномів, що апроксимують найбільш подібну (з нашого погляду) до шуканої кривої криву густини моделі IASP91 та розраховану нами за рівнянням Адамса – Уільямсона криву під Українським щитом. Результат представлено на рис. 7. Як бачимо, введення цих поправок також не позбавляє внесення штучних стрибків густини.

На наш погляд, оптимальний результат для кривої густини для мантийного домену з координатами 28,25E 49N був отриманий при введенні поправок у вигляді різниці поліномів для теоретичної кривої густини та отриманої за рівнянням Адамса – Уільямсона для моделі IASP91. З рис. 8 видно, що отримана таким чином крива густини не спотворена привнесеними стрибками густини моделі IASP91, дотримується розташування сейсмічних границь, отриманих по перегибах кривої P -швидкості. При цьому крива густини, отримана за рівнянням Адамса – Уільямсона, трансформується у криву, максимально наближену до кривої густини, отриманої при внесенні поправок від середньої кривої густини при збереженні геометрії кривої сейсмічної швидкості P - і S -хвиль, що свідчить на користь того, що ця крива густини є оптимальною.

Висновки. Розглянуто кілька варіантів трансформації розрахункової кривої густини:

- на основі середньоарифметичної поправки за п'ятьма референтними моделями (PEMC, PEMA, PREM, AK135, IASP91);
- з використанням опорних точок, що відображають сейсмічні границі, для визначення інтервалів обчислення густини за рівнянням Адамса – Уільямсона;
- при введенні поправок у вигляді різниці поліномів для теоретичної кривої густини та отриманої за рівнянням Адамса – Уільямсона для моделі IASP91.

Показано, що розраховані значення густини не є точними, а є лише наближенням, що відповідає застосованому математичному апарату.

Використання поправки за поліномом для референтної моделі IASP91 в інтервалах сейсмічних границь, визначених по перегибах перших похідних кривої швидкості P -хвиль, дозволяє отримати криву густини, не спотворену стрибками її значень, які притаманні моделі IASP91. Отримана з використанням полінома різниці крива густини відображає геометрію кривої сейсмічних швидкостей, у нашому випадку – для мантийного домену під УЩ із координатами центра 28,25E 49N.

Таким чином, у цьому дослідженні було отримано оптимальну одновимірну модель розподілу густини, наближену до фізичної моделі, яка відповідає швидкісній кривій для мантиї на глибинах 50–2600 км під північно-західною частиною Українського щита.

Список використаних джерел

- Буллен, К.Е. (1978). Плотность Земли. М.: Мир.
- Викулин, А.В. (2004). Введение в физику Земли. Учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: изд-во КГПУ.
- Викулин, А.В. (2008). Физика Земли и геодинамика. Учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга.
- Жарков, В.Н. (2013). Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику. М.: ООО "Наука и образование".
- Захаров, В.С., Смирнов, В.Б. (2016). Физика Земли. Москва: Инфра-М.
- Магницкий, В.А. (1965). Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра.
- Саваренский, Е.Ф., Кирнос, Д.П. (1955). Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Гостехиздат.
- Тарасов, В.Н., Бояркина, И.В. (2014). Момент инерции земного шара. *Омский научный вестник*, 2 (130), 9–10.
- Федотов, С.А. (1963). О поглощении поперечных сейсмических волн в верхней мантии и энергетической классификации близких землетрясений с промежуточной глубиной очага. *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.*, 6, 820–849.
- Шумлянская, Л., Дубовенко, Ю., Пигулевский, П. (2021). О возможности создания синтетической S -скоростной модели путем пересчета P -скоростной модели. *Вісник Київського національного університету*

імені Тараса Шевченка. *Геологія*, 4 (95), 46–53. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.06>

- Шумлянская, Л.А., Трипольский, А.А., Цветкова, Т.А. (2014). Влияние скоростной структуры коры на результаты сейсмической томографии Украинского щита. *Геофизический журнал*, 36, 4, 95–117.
- Birch, F. (1939). The variation of seismic velocities within a simplified earth model, in accordance with the theory of finite strain. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 29 (3), 463–479.
- Birch, F. (1961). Composition of the Earth's Mantle. *Geophys. J.*, 4, 295–311.
- Birch, F. (1964). Density and composition of mantle and core. *J. Geophys. Res.*, 69, 4377–4388.
- Fowler, C.M.R. (2004). The solid earth: an introduction to global geophysics. 2nd ed.p.cm.
- Geyko, V.S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофизический журнал*, 26, 2, 3–32.
- McQueen, R.G., Fritz, J.N., Marsh, S.P. (1964). On the composition of the Earth's interior. *J. Geophys. Res.*, 69(8), 2947–2965.
- Shumlianska, L.O., Dubovenko, Y.I., Pigulevskyy, P.H. (2020). 2.5 dimensional model of mantle heterogeneities under the Ukrainian shield according to the gradients of the velocities of seismic waves. *Journal of Geology Geography and Geoecology*, 29(2):431–441. DOI: 10.15421/112039
- Simmons, G. (1964). Velocity of shear waves in rocks to 10 kilobars, part 1. *J. Geophys. Res.*, 69(6), 1123–1130.
- Tooley, R.D., Spencer, T.W., Sagoci, H.F. (1965). Reflection and transmission of plane compressional waves. *Geophysics*, 30 (4), 552–570. doi:10.1190/1.1439622

References

- Birch, F. (1939). The variation of seismic velocities within a simplified earth model, in accordance with the theory of finite strain. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 29 (3), 463–479.
- Birch, F. (1961). Composition of the Earth's Mantle. *Geophys. J.*, 4, 295–311.
- Birch, F. (1964). Density and composition of mantle and core. *J. Geophys. Res.*, 69, 4377–4388.
- Bullen, K.E. (1978). Density of the Earth. M.: Mir. [in Russian]
- Fedotov, S.A. (1963). On the absorption of shear seismic waves in the upper mantle and the energy classification of nearby earthquakes with an intermediate source depth. *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Ser. geophys.*, 6, 820–849. [in Russian]
- Fowler, C.M.R. (2004). The solid earth: an introduction to global geophysics. 2nd ed.p.cm.
- Geyko, V.S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофизический журнал*, 26, 2, 3–32.
- Magnitsky, V.A. (1965). Internal structure and physics of the Earth. M. Nedra. [in Russian]
- McQueen, R.G., Fritz J.N., Marsh S.P. (1964). On the composition of the Earth's interior. *J. Geophys. Res.*, 69(8), 2947–2965.
- Savarensky, E.F., Kirnos D.P. (1955). Elements of seismology and seismometry. M.: Gostekhizdat. [in Russian]
- Shumlianska, L., Dubovenko Yu., Pigulevsky P. (2021). The possibility of creating a synthetic S -velocity model by recalculating the P -velocity model. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, (95), 46–53. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.06> [in Russian]
- Shumlianska, L.A., Tripolsky A.A., Tsvetkova T.A. (2014). Influence of the velocity structure of the crust on the results of seismic tomography of the Ukrainian Shield. *Geophysical Journal*, 36, 4, 95–117. [in Russian]
- Shumlianska, L.O., Dubovenko Y.I., Pigulevskyy P.H. (2020). 2.5 dimensional model of mantle heterogeneities under the Ukrainian shield according to the gradients of the velocities of seismic waves. *Journal of Geology Geography and Geoecology*, 29(2):431–441. DOI: 10.15421/112039
- Simmons, G. (1964). Velocity of shear waves in rocks to 10 kilobars, part 1. *J. Geophys. Res.*, 69(6), 1123–1130.
- Tarasov, V.N., Boyarkina I.V. (2014). Moment of inertia of the globe. *Omsk Scientific Bulletin*, 2 (130), 9–10. [in Russian]
- Tooley, R.D., Spencer, T.W., Sagoci, H.F. (1965). Reflection and transmission of plane compressional waves. *Geophysics*, 30 (4), 552–570. doi:10.1190/1.1439622
- Vikulin, A.V. (2004). Introduction to the physics of the Earth. Textbook for geophysical specialties of universities. Petropavlovsk-Kamchatsky: publishing house of the KGPU. [in Russian]
- Vikulin, A.V. (2008). Physics of the Earth and Geodynamics. Textbook for geophysical specialties of universities. Petropavlovsk-Kamchatsky: Publishing house of KamSU im. Vitus Bering. [in Russian]
- Zakharov, V.S., Smirnov V.B. (2016). Physics of the Earth. Moscow: Infra-M. [in Russian]
- Zharov, V.N. (2013). Internal structure of the Earth and planets. Elementary introduction to planetary and satellite geophysics. Moscow: ООО "Science and Education". [in Russian]

Надійшла до редколегії 19.12.21

L. Shumlianska, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: lashum@ukr.net;
P. Pigulevskiy, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher;
Institute of geophysics of S.I. Subbotina name of NAS of Ukraine,
32 Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

APPLICATION OF POLYNOMIAL CORRECTIONS TO CONSTRUCT AN OPTIMAL ONE-DIMENSIONAL DENSITY MODEL OF THE MANTLE

In this work, an optimal one-dimensional density model was obtained, corresponding to the velocity curve for one of the mantle domain under the Ukrainian shield.

When obtaining a one-dimensional density model, only the Earth's mass and seismic velocities are known physical parameters. The density is obtained by solving the Adams-Williamson equation, the use of which is possible under the assumption that the density is created only by the weight of the upper layers, with a homogeneous composition of the mantle. Some approximation to the real density distribution gives a seismic parameter that scales the obtained densities in accordance with the geometry of the seismic velocity distribution, while, as shown by our studies, the obtained density values are not absolute, but only an approximation corresponding to the equation is used.

In order to obtain a density distribution we transform the first approximation obtained from the Adams-Williamson equation. This paper shows several options for transformation; based on the arithmetic mean correction for 5 reference mantle models (PEMC, PEMA, PREM, AK135, IASP91); using control points representing seismic boundaries to determine the intervals for computation of density using the Adams-Williamson equation; when introducing corrections in the form of the difference between the polynomials for the theoretical density curve and that obtained by the Adams-Williamson equation for the IASP91 model. The density curve obtained by the last method is not distorted by the introduced density jumps from the IASP91 model, correspond to positions of seismic boundaries along the inflections of the P-velocity curve. The density curve obtained from the Adams-Williamson equation is transformed into a curve that is as close as possible to the geometry of the inherent curve seismic velocity of P and S waves.

In our opinion, the density curve obtained using the difference polynomial shows the most approximate solution to the optimal density model for a given seismic velocity distribution, in our case, for the mantle domain under the Ukrainian shield with center coordinates 28.25E 49N.

Keywords: density, mantle, Adams-Williamson equation, corrective polynomials.

УДК 550.837:550.8.05

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.08>

С. Попов, канд. геол. наук,

E-mail: 817614@ukr.net;

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

E-mail: ks_bondar@ukr.net;

Р. Хоменко, канд. геол. наук, асист.,

E-mail: hristianin@bigmir.net,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

М. Бондарьков, ген. директор,

E-mail: mbondarkov@chornobyl.net;

А. Максименко, зам. ген. директора,

E-mail: amaksimenko@chornobyl.net,

ДНДУ "Чорнобильський центр з проблем ядерної безпеки,

радіоактивних відходів та радіоекології" ДАЗВ України,

вул. 77-ї Гвардійської дивізії, 11, Славутич, 07101, Україна

МЕТОДИКА ГЕОФІЗИЧНОГО КАРТУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ МІСЦЬ ЗАХОРОНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

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

Захоронення радіоактивних відходів (РАВ) у Чорнобильській зоні відчуження і сьогодні містять значні об'єми матеріалів, що діляться. При цьому відомості про кількість РАВ, похованих під час аварії, не можна назвати вичерпними. У зв'язку з підсиленням міжнародних вимог до екологічної безпеки були проведені роботи з детального обстеження захоронень РАВ, створених при ліквідації аварії на Чорнобильській АЕС.

У роботі були задіяні такі неінвазивні методи геофізичних досліджень: 1) детальна магнітометрія; 2) георадарний метод; 3) томографія електричного опору на постійному струмі. Магнітометрія дозволила закартувати об'єкти та виділити найбільш імовірні місця захоронення контейнерів із речовинами, що діляться. Геоелектричні моделі показали відмінність електричного опору різних ділянок одного захоронення, що пояснюється зміною вологості і може свідчити про підтоплення. Рівень ґрунтових вод установлений за допомогою георадарного методу. У результаті інтерпретації даних геофізичних досліджень були відновлені геометричні параметри і особливості конструкції об'єкта попереднього захоронення радіоактивних відходів "Третя черга ЧАЕС", що дозволило створити його тривимірну модель і визначити місця для подальшого застосування прямих радіоактивних методів досліджень.

Ключові слова: магнітометрія, томографія електричного опору, георадарні дослідження, доза випромінювання, радіоактивні відходи, ґрунтові води.

Вступ. На території зони відчуження (ЗВ) існують об'єкти, у яких передбачається наявність матеріалів, що діляться, і до яких можливий несанкціонований доступ. Виявлення і детальне картування таких місць є важливим питанням безпеки цих об'єктів. Чорнобильським центром із проблем ядерної безпеки, радіоактивних відходів та радіоекології за підтримки Департаменту енергетики (DOE) Сполучених Штатів Америки у період 2013–2016 рр. був виконаний проєкт із пошуків та досліджень матеріалів, що діляться, у ЗВ. На підставі попереднього оцінювання для детального обстеження із залученням геофізичних методів були вибрані об'єкти попереднього захоронення радіоактивних відходів (ПЗРВ) "Третя черга ЧАЕС" (ділянка 1) та борт захоронення радіоактивних відходів (РАВ), який знаходиться в районі об'єкта "Укриття" і отримав умовну назву "Об'єкт 300 м від ОУ" (ділянка 2) (рис. 1).

Метою роботи було вивчення місць розташування будівельних конструкцій пунктів захоронення та місць локалізації залізних контейнерів із високоактивними радіоактивними відходами (РАВ). За отриманими результатами неінвазивних досліджень визначалися місця для проведення інвазивних досліджень, направлених на пошук місць розташування РАВ та вивчення їхніх характеристик (Бондарьков, 2017).

Методи досліджень. Для проведення досліджень використовувався комплекс польових геофізичних і лабораторно-аналітичних методів. Вивчення кожного об'єкта проводилося у два етапи. На першому етапі виконувалися поверхневі дослідження: геодезичне знімання, поверхневе гамма-знімання, магнітометрія, георадарні вимірювання, електрометрія. На цьому етапі визначалася конфігурація та структура об'єкта,

виявлялися окремі аномалії, які могли бути пов'язані із залізними контейнерами. На другому етапі виконувалися роботи із вторгненням у тіло поховання поблизу виявлених аномалій для визначення видів і розподілу похованих РАВ та відбору проб для лабораторних досліджень. Проводилося буріння свердловин для нейтронного і гамма-каротажу, відбір проб для лабораторних досліджень. Буріння проводилося в межах насипної частини та не порушувало залізобетонних конструкцій поховання або залізних контейнерів.

Модульні магнітометричні спостереження – вимірювання індукції геомагнітного поля – виконані цезієвими магнітометрами ПКМ-1 (Геологоразведка, РФ), датчики яких мають роздільну здатність 0,001 нТл, межа СКВ вимірювання магнітної індукції 0,01 нТл.

Магнітне знімання проводилося за стандартною методикою одним цезієвим магнітометром, другий використовувався під час вимірювань як варіаційна станція, тобто записував зміни магнітного поля в часі. У рамках планшетів знімання відстань між профілями становила 2 м, оператор-геофізик у процесі знімання рухався "змійкою". Варіаційна станція працювала з такою самою швидкістю, що і магнітометр, який використовувався для вимірювання магнітного поля ділянки досліджень – 10 вимірів/сек. У процесі обробки польової інформації врахування варіацій здійснювалося шляхом віднімання запису варіаційної станції, інтерпольованого сплайном Акіми, від вимірних значень по профілю.

Із запису вилучалась також нормальна складова поля, апроксимована лінійною регресією по профілю. Масив залишкових значень був інтерпольований до регулярної мережі 1х1 м, за яким побудовані карти аномалій індукції геомагнітного поля (Ba).

© Попов С., Бондар К., Хоменко Р., Бондарьков М., Максименко А., 2022



Рис. 1. Загальний вигляд території ЗВ у районі ЧАЕС із позначенням дослідних ділянок

Георадарне сканування виконано по поверхні об'єкта ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС". Використано георадар виробництва "Transient technologies" (Україна) VIY-2-300 із центральною робочою частотою 300 МГц.

Дані отримані по мережі профілів, орієнтованих у напрямку схід-захід (рис. 2), у безперервному режимі знімання. При цьому виконано 500 замірів на трасі, часовий діапазон становив 120 нс, інтервал між трасами становив 32 мм. При обробці та інтерпретації георадарних даних переважно використано стандартний набір фільтрів програми Synchro 3 (Ivashchuk, 2019), рекомендований виробником. Обробка даних складалася із послідовних кроків: 1) закріплення нульового рівня – для правильного визначення глибини необхідно поєднати початок шкали глибин із певною точкою прямого імпульсу (напр. точкою максимальної амплітуди); 2) вейвлет-фільтрація для ефективного придушення низькочастотних електромагнітних коливаль і високочастотних шумів; 3) видалення фоновому сигналу в заданому вікні, у результаті чого від кожної траси профілю віднімається траса в обраному вікні (ширина вікна усереднення задається загальною кількістю в 300 трас); 4) підсилення сигналу – для поліпшення розпізнавання глибоких аномалій.

Вивчення геоелектричного розрізу на об'єкті ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС" здійснювалося методом томографії електричного опору (ТЕО). Вимірювання виконані за допомогою багатоелектродного устаткування "ELIZA-1" (Хоменко та ін., 2013). Устаткування має такі основні характеристики: вимірювання здійснюються на постійному струмі; кількість електродів – 64; крок розстановки електродів – 1 м; кількість вимірювальних каналів – 1. Для визначення позірному опору використана модифікація симетричної чотириелектродної установки. З огляду на малу (до 11 м) глибини досліджень і використання багатокаскадного фільтруючого вхідного тракту запису, електрометричні вимірювання здійснювалися за низької напруги близько 40–50 В. Значення струмів у лінії АВ при цьому змінювалися із 4 до 50 мА.

Обробка даних проводилася у програмі RES2dinv, яка дозволяє реалізовувати блокові схеми розв'язання прямої та оберненої (інверсної) задачі у класі 2-D-моделей

(Loke, Barker, 1996; Loke, 2009). Для інверсії експериментальних даних обраний алгоритм Оссам-Marquardt, який здійснює комбіновану гладко-контрастну схему інверсії, засновану на використанні гаус-ньютонівського методу найменших квадратів: Оссам – інверсія з використанням згладжуючого оператора і додатковою мінімізацією контрастності, що дозволяє отримувати гладкий розподіл параметра (питомого опору ρ); Marquardt – алгоритм інверсії, що забезпечує отримання контрастної моделі розподілу параметра середовища.

Результати обстеження ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС". Об'єкт, досліджений на ділянці 1, – це спеціально створена будівельна конструкція для захоронення РАВ, яка не була закінчена до моменту аварії. Історичні відомості про використання цієї споруди в 1986 р. свідчать про надходження РАВ безпосередньо зі зруйнованого четвертого блоку в перший період ліквідації наслідків аварії. На жаль, точних відомостей про радіонуклідний склад і активність похованих РАВ у проектно-конструкторській документації об'єкта не збереглося. Відомо, що сховище складається із семи каньйонів. Повздовжні стіни завдовжки від 90 до 140 м виконані зі збірному залізобетону. Ширина кожного каньйону становить ≈ 6 м, висота стін ≈ 5 м, торцеві стіни відсутні. Поверхневі розміри ПЗРВ 50x170 м, оціночні розміри основного тіла поховання (у межах будівельних конструкцій) 42x120 м (25 200 м³). Усе сховище законсервовано в 1988–1989 рр. шаром глини і ґрунту.

Поверхневе гамма-знімання території поховання не виявило підвищених рівнів гамма-випромінювання. При візуальному огляді поверхні об'єкта виявлено велику кількість значних суфозійних провалів консервуючого шару. Вимірювання потужності еквівалентної дози (ПЕД), виконані у провалах і поверхневих свердловинах (на глибину консервуючого шару), виявили зростання рівнів гамма-випромінювання із глибиною.

Дані магнітного знімання дозволили уточнити конструкцію сховища. Магнітні маси у сховищі розподілені нерівномірно. Найбільше чорного металу міститься у південній частині та під східною стіною (рис. 2, 3).

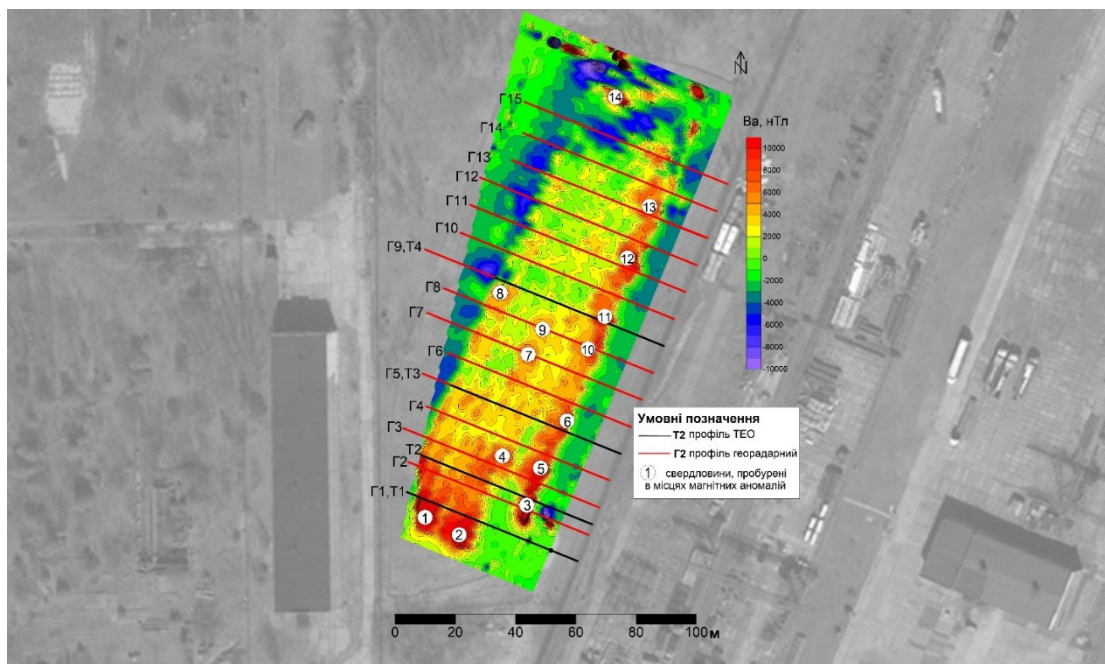


Рис. 2. Схема проведення геофізичних досліджень методами магнітометрії, томографії електричного опору та георадіолокації з позначенням місць буріння свердловин

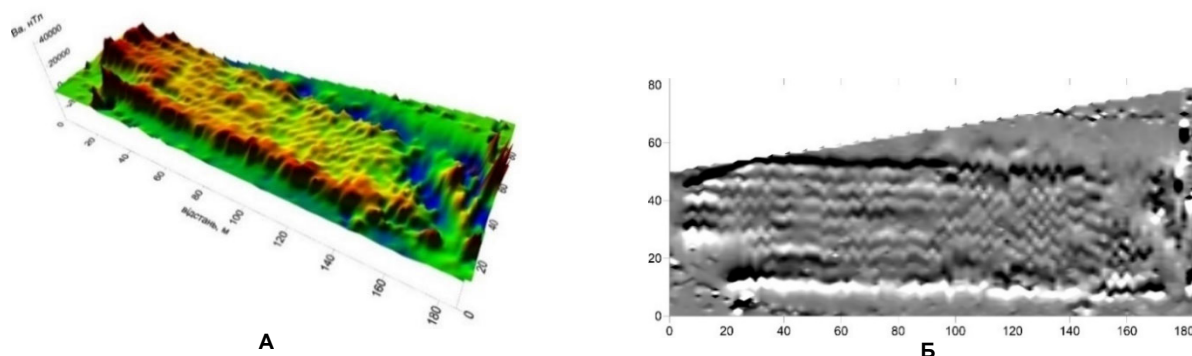


Рис. 3. ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС". Тривимірний модель геомагнітного поля (А) та карта після застосування фільтра Shift and Difference (Б)

У структурі геомагнітного поля об'єкта (рис. 2, 3) виділяються всі сім каньйонів, однак довжина і стан стін різняться. Положення кожної зі стін вдалося встановити досить точно за стрічкоподібними аномаліями, які яскраво проявилися після застосування фільтра Shift and Difference Filter з арсеналу Golden Software Surfer 13 (рис. 3, Б). Отримана карта фактично є зображенням горизонтального градієнта B_a у напрямку захід – схід. Східна бокова стіна сховища і дві наступні за нею на 30 м коротші за інші стіни. Північною межею усієї конструкції можна вважати негативну аномалію, видовжену в напрямку захід – схід.

Більш детальну інформацію про будову ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС" вдалося отримати з геоелектричних розрізів, отриманих методом ТЕО, а також георадарних вимірювань.

Вивчення геоелектричного розрізу на об'єкті ПЗРВ "Третя черга ЧАЕС" здійснювалося методом томографії електричного опору вздовж серії поперечних профілів, показаних на рис. 2. З масиву даних інверсії були виділені помилкові значення і точки із середньоквадратичною похибкою (СКП), що перевищує 80 %. Модель приймалася після п'яти ітерацій або менше, якщо спостерігалася повільна швидкість збіжності (менше 1 %). Оскільки питомий опір піщаного ґрунту, який до того ж

може бути суттєво зволожений, значно нижчий, ніж питомий опір бетонних конструкцій, а розріз споруди загалом може бути дуже неоднорідний, то вважаємо за можливе прийняти модель із досить високою СКП як таку, що адекватно відображає будову об'єкта.

Питомий опір бетону змінюється в межах 200–1000 Ом*м (Лесников, Паранин, 2017), наявність арматури з опором 1 мкОм*м, а також металевих контейнерів із РАВ може знижувати опір. Водночас наявність порожнин, навпаки, здатна підвищувати його. Отже, питомий опір багато в чому залежить від ступеня руйнування конструкції та характеру її заповнення.

Природно-антропогенний розріз, будову якого визначаємо за інвертованими профілями ТЕО, характеризується значеннями опору, що змінюються в межах 1–4000 Ом*м. Нижній шар усіх розрізів має опір <10 Ом*м, що однозначно свідчить про його обводнення. Рівень ґрунтових вод (РГВ) становить близько 2,3 м на плоскій ділянці зі східного боку сховища. Ця позначка РГВ підтверджується також даними георадарних вимірювань (рис. 5). Добре заізовані бетонні конструкції характеризуються питомим опором >1000 Ом*м. Проміжні значення опору обумовлені обмеженнями чутливості методу, що не здатний розрізнити різкі границі неоднорідностей усередині ґрунтових шарів (рис. 4).

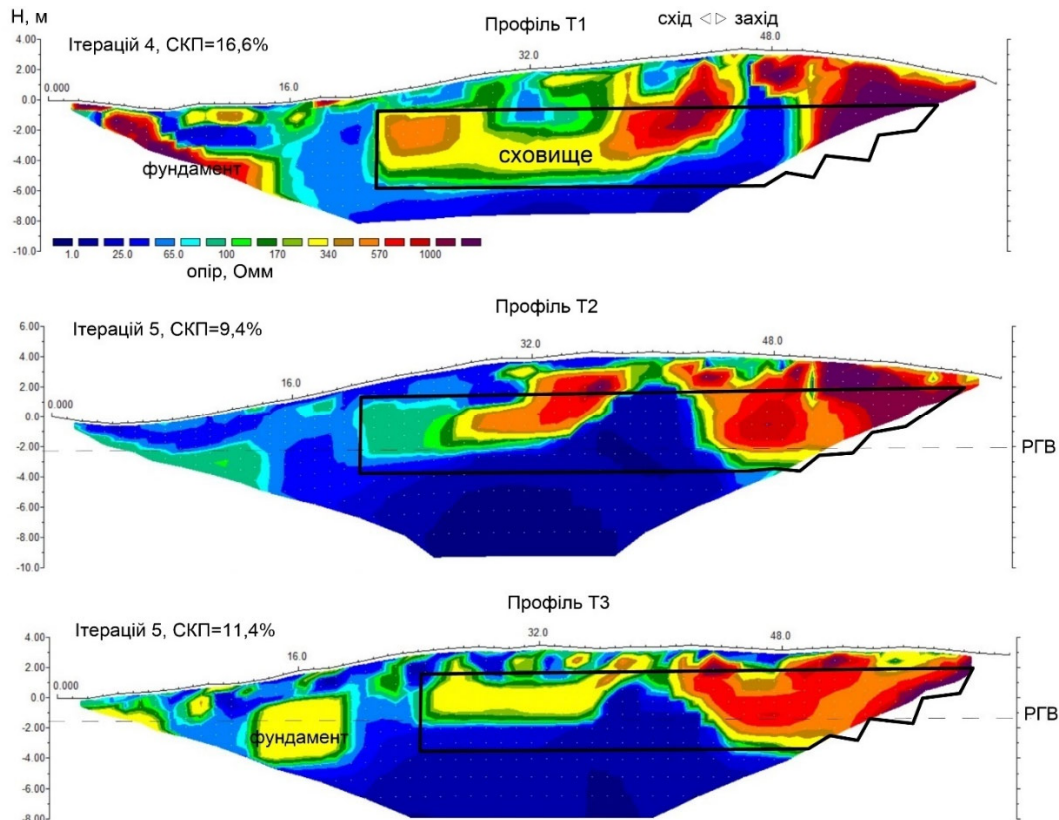


Рис. 4. ПЗРО "Третя черга ЧАЕС". Приклади геоелектричних розрізів, які перетинають сховище

Зокрема, профіль Т1 (рис. 3) перетинав пагорб сховища в напрямку зі сходу на захід. Бетонний короб конструкції, імовірно, не є монолітним. На розрізі бачимо розрив у його структурі на 47 м від початку профілю (рис. 4). Верхній шар засипки об'єкта також не є однорідним і містить уламки високоомних матеріалів (бетону?). Значення, що перевищують 1000 Ом, фіксуються у західній частині розрізу, що може свідчити про хорошу гідроізоляцію західних каньйонів сховища, а також на початку профілю, де, імовірно, зачепили фундамент іншої споруди. Високі опори двох західних каньйонів сховища можуть бути також пов'язані з їхньою засипкою високоомним бетонним сміттям. Нижній провідний шар відповідає підтопленому ґрунту.

Згідно з геоелектричними розрізами по профілях Т2 та Т3 (рис. 4) східна частина сховища, імовірно, підтоплена ґрунтовими водами. Низькоомна ділянка у районі

третього зі сходу каньйону просторово відповідає пониженим значенням індукції геомагнітного поля (рис. 3), що, можливо, свідчить про недосконалість конструкції або руйнацію підлоги сховища.

Попри великий обсяг виконаних георадарних досліджень, їх результати не виявилися інформативними через товстий шар глинистої засипки (близько 1 м), який перекриває об'єкт. Глинистий прошарок у розрізі призводить до великих втрат енергії електромагнітної хвилі – згасання сигналу. Тому ґрунт із більш ніж 35 % глини ефективно адсорбує електромагнітні хвилі, забезпечуючи малу глибину проникнення для георадарів (Daniels, 2004). Однак на ділянці поблизу об'єкта георадарне сканування дозволило встановити двошарову будову піщанистого ґрунтового розрізу, а також виявити рівень ґрунтових вод, який становить близько 2,2 м від денної поверхні у східній частині профілю Г7 (рис. 5).

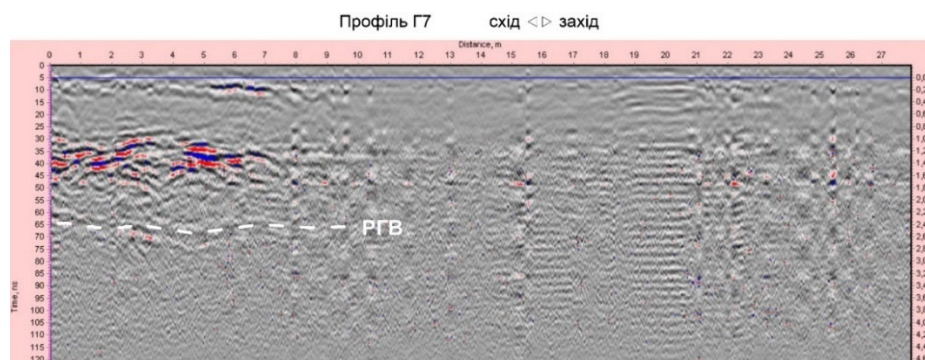


Рис. 5. ПЗРО "Третя черга ЧАЕС". Фрагмент радарограми по профілю Г7 (східна частина)

У результаті інтерпретації даних геофізичних досліджень були відновлені геометричні параметри та

особливості конструкції ПЗРО "Третя черга ЧАЕС", що дозволило створити його тривимірну модель (рис. 6).

Результати обстеження бурту "Об'єкт 300 м від ОУ" (ділянка 2 на рис. 1). Об'єкт являє собою борт заввишки до 3 м, витягнутий уздовж автодороги на ЧАЕС зі сходу на захід, завдовжки ≈ 93 м, завширшки ≈ 15 м. Поверхня бурту нерівна, південний бік круто падає до дороги; східна і північна частини – високі, із заростями молодого лісу. "Підосва" бурту міститься на позначці 107 м (позначка рівня води в р. Прип'ять 103 м). Поверхнєве гамма-знімання об'єкта не виявило значних джерел випромінювання. При магнітометричному дослідженні об'єкта виявлено низку позитивних магнітних аномалій (рис. 7), що вказує на наявність великої

кількості чорного металу. У точках із найбільш високими значеннями потужності еквівалентної дози були виконані розвідувальні свердловини.

У результаті буріння розвідувальних свердловин установлено, що для більшої частини об'єкта під шаром радіоактивно забрудненого ґрунту містився шар бетону або щебню. Максимальні значення ПЕД гамма-випромінювання спостерігалися в поверхневому шарі ґрунту на глибині від 60 см. У свердловинах, де не було виявлено бетон, підвищені значення потужності дози поширювалися на глибину до 2 м.

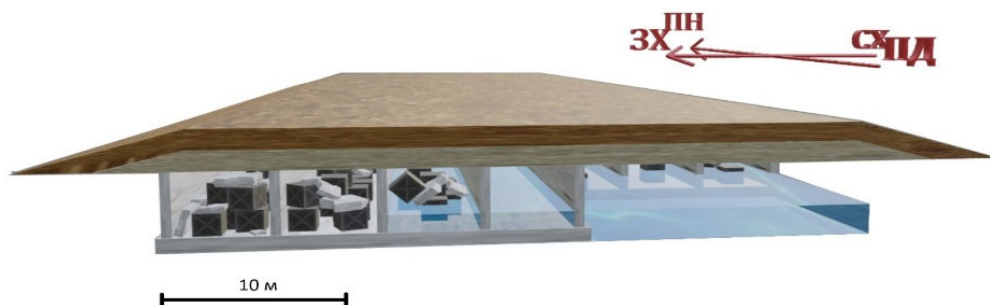


Рис. 6. ПЗРО "Третя черга ЧАЕС". Тривимірна модель

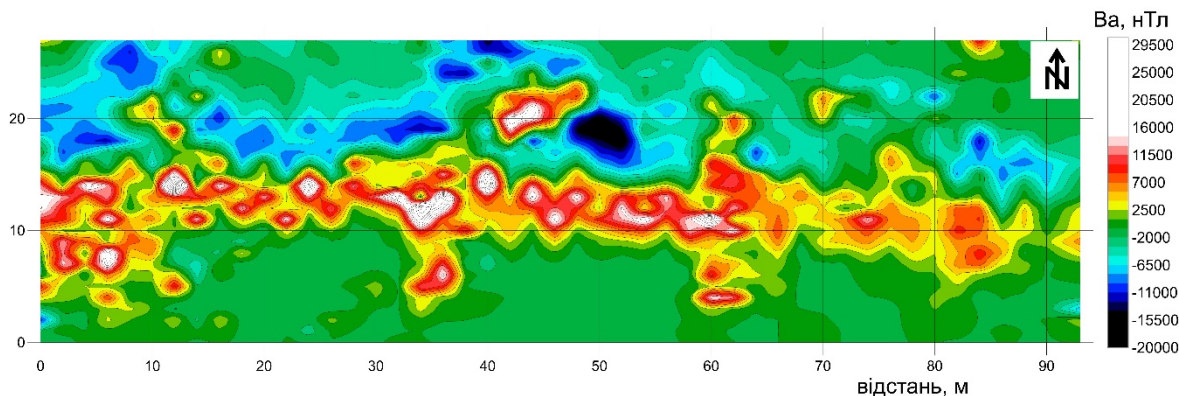


Рис. 7. Карта аномалій магнітної індукції на ділянці "Об'єкт 300 м від ОУ"

Висновки. Комплексування польових магнітометричних, електрометричних та георадарних досліджень на ПЗВР у Чорнобильській зоні відчуження дозволило відновити структуру, оцінити стан збереженості та надати обґрунтовані рекомендації для буріння з метою виявлення скупчень РАВ. Зокрема, на об'єкті ПЗВР "Третя черга ЧАЕС" за допомогою високоточної магнітометрії встановлені межі й окремі елементи конструкції сховища, виділені зони скупчень металевих контейнерів з РАВ. За даними томографії електричних опор та георадарних досліджень діагностовано часткове підтоплення об'єкта ґрунтовими водами. Знання про матеріальний склад ПЗВР та ПТЛРВ, які можливо отримати за допомогою буріння, допоможуть пояснити аномалії водневого показника (рН) та надзвичайно високого вмісту ^{90}Sr у ґрунтових водах на цих об'єктах (Matrosov et al., 2018). Магнітні дослідження "Об'єкта 300 м від ОУ" дозволили окреслити межі сховища. Цей геофізичний комплекс можна рекомендувати для діагностики стану техногенних об'єктів.

Список використаних джерел

Бондарьков, М.Д., Максименко, А.М., Осолков, Б.Я., Антропов, В.М., Мельниченко, В.П., Третьяк, О.Г. (2017). Исследования делящихся материалов в объектах захоронения радиоактивных отходов в Чернобыльской зоне отчуждения. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*, 28, 45–54.

Лесников, Д.В., Паранин, А.В. (2017) О подходе к расчету электрического сопротивления железобетонных конструкций. *Известия Транссиба*, 3(31), 102–114.

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

Daniels, D.J. (2004). Ground Penetrating Radar. 2nd Edition. The Institute of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

Ivashchuk, V., Borodavka, V., Prokhorenko, V., Chu, Xin, Pavluk, A. (2019). Synchro 3. Ver.3.11.1.5. Отримано 3 http://viy.ua/download/install_VIY_SGPR.zip

Loke, M.H. (2009). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Loke, M.H., Barker, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131–152. doi:10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x

Matrosov, D.T., Shevchenko, O.L., Nosovskyi, A.V., Panasiuk, M.I. (2018). Data analysis of radiation and hydroecological monitoring of ground waters located at the industrial site of Chornobyl NPP. *XII International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13–16 November 2018, Kyiv, Ukraine. Monitoring_2018_eng.pdf., 1–5.

Reference

Bondarkov, M.D., Maksimenko, A.M., Oskolkov, B.A., Antropov, B.M., Melnichenko, V.P., Tretiak, O.G. (2017). Investigation of fissile materials in radioactive waste disposal facilities in the Chernobyl exclusion zone. *Problems of safety of nuclear power plants and Chernobyl*, 28, 45–54. [in Russian]

Daniels, D.J. (2004). Ground Penetrating Radar, 2nd Edition. The Institute of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

Ivashchuk, V., Borodavka, V., Prokhorenko, V., Chu, Xin, Pavluk, A. (2019). Synchro 3. Ver.3.11.1.5. Retrieved from http://viy.ua/download/install_VIY_SGPR.zip

Khomenko, R., Bondar, K., Popov, S. (2013). New high-resolution shallow-depth multi-electrode equipment for electrical resistivity tomography. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(61), 36–40. [in Ukrainian]

Lesnikov, D.V., Paragin, A.V. (2017). On the approach to calculating the electrical resistance of reinforced concrete structures. *Journal of Transsib Railway Studies*, 3(31), 102–114. [in Russian]

Loke, M.H. (2009). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Loke, M.H., Barker, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131–152. doi:10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x

Matrosov, D.T., Shevchenko, O.L., Nosovskyi, A.V., Panasiuk, M.I. (2018). Data analysis of radiation and hydroecological monitoring of ground waters located at the industrial site of Chornobyl NPP. *XII International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment", 13–16 November 2018, Kyiv, Ukraine. Monitoring_2018_eng.pdf.*, 1–5.

Надійшла до редколегії 15.07.21

S. Popov, PhD (Geol.),
E-mail: 814614@ukr.net;
K. Bondar, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: E-mail: ks_bondar@ukr.net;
R. Khomenko, PhD (Geol.),
E-mail: E-mail: hrstianin@bigmir.net,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
M. Bondarkov, Director General,
E-mail: mbondarkov@chornobyl.net;
A. Maksymenko, Deputy Director General,
E-mail: amaksimenko@chornobyl.net,
Chornobyl Center, PO Box 151,
11 77-th Gvardiis'ka dyviziya Str., Slavutych, 07100, Ukraine

COMBINATION OF GEOPHYSICAL TECHNIQUES FOR MAPPING AND MONITORING OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FACILITIES

Sites of radioactive waste disposal in Chernobyl exclusion zone still contain significant amounts of fissile materials. At the same time, the information on the amount of radioactive material buried during the accident cannot be called satisfactory. Within the strengthening international safety and environmental requirements, special activities were initiated to survey the radioactive waste disposals created during the liquidation of the accident at the Chernobyl nuclear power plant.

The work involved the following combination of non-invasive geophysical methods: 1) high-resolution magnetometry; 2) ground penetrating radar (GPR) 3) direct current electrical resistivity tomography (ERT). Magnetometry provided the detailed map of facilities, and highlighted the sites where containers with fissile substances had been buried. ERT models revealed variations in the resistivity across the disposal site, which is associated with different water content, and may indicate flooding. Ground water level was determined from GPR measurements. The combined interpretation of geophysical results served a basis for designing the geometric model of the "Chernobyl 3rd stage" radioactive waste disposal facility. It was used to determine the places for subsequent applying direct radioactive methods for investigation and monitoring of this disposal site.

Keywords: magnetometry, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar, radiation dose, radioactive waste, groundwater.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.042: 553.43

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.09>В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vladvam@gmail.com;М. Курило, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: mvirshylo@gmail.com;О. Андрєєва, канд. геол. наук,
E-mail: andreeva_ea@ukr.net;С. Шнюков, д-р геол. наук, доц.,
E-mail: shnyukov54@gmail.com;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ПРОМИСЛОВОЇ РУДОНОСНОСТІ ПРОЯВУ МІДІ ЖИРИЧІ

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

На основі аналізу матеріалів геологорозвідувальних робіт на прояві міді Жиричі Волинського рудного району проведено його геолого-економічне переоцінювання, у тому числі здійснено перерахунок запасів і прогнозних ресурсів прояву. Як з'ясувалося, у процесі ГРП запаси і прогнозні ресурси прояву були штучно суттєво перебільшені, що вводить в оману потенційних інвесторів. Це сталося насамперед завдяки помилковій інтерпретації геологічної будови родовища, форми і розміру рудних тіл. Зокрема, викликає великі сумніви анонсована в матеріалах ГРП значна горизонтальна протяжність рудних тіл, які за товщини 1–3 м простягаються на кілька кілометрів (до 4–5 км). На наш погляд, вони представлені переважно лінзоподібними тілами порівняно невеликої протяжності (від перших десятків до перших сотень метрів). За нашими розрахунками прогнозні ресурси міді категорії P_1 становлять 220,4 тис. т, що в чотири рази менше, ніж наведено у відповідних матеріалах ГРП. Що стосується запасів міді категорії C_2 , а також прогнозних ресурсів благородних металів, то вони мають бути включені з підрахунку як необґрунтовані та недостовірні. Здійснений підрахунок техніко-економічних показників освоєння рудопояву Жиричі свідчить про слабку економічну ефективність його ймовірної експлуатації, що має враховуватися під час розгляду щодо вкладення інвестицій у цей об'єкт.

Ключові слова: мідь, рудопояв Жиричі, запаси, ресурси, геолого-економічне оцінювання.

Вступ. Постановка проблеми. Забезпечення України власною мінерально-сировинною базою (МСБ) мідних руд є актуальним завданням геологічної галузі нашої країни, тим більше що спостерігається постійне зростання ціни на мідь. Наприклад, тільки за 2020 р. вартість тону міді на міжнародних ринках зросла на \$1 560 – із \$6 271 на 01.01.2020 р. до \$7 831 на 18.12.2020 р. (24,9 %). Мідна промисловість України, представлена Артемівським заводом з обробки кольорових металів, Запорізьким заводом кольорових металів, виробничим підприємством "Панком-Юн" (Одеса), забезпечується імпортною сировиною (*Перспективи розвитку...*, 2011). Тим часом в Україні відомо понад 150 проявів міді (*Гурский та ін.*, 2006), найбільший інтерес з яких становлять прояви самородної міді у рифейських трапах Волинського рудного району, зокрема прояв Жиричі. Тому Програмою розвитку МСБ України передбачено проведення геологорозвідувальних робіт (ГРП) на території рудного району і підготовка найперспективнішого об'єкта до промислового освоєння (*Загальнодержавна програма...*, 2011). Проблема полягає у відсутності об'єктивного геолого-економічного оцінювання цього та інших проявів, що стримує залучення інвестицій для їх можливого промислового використання чи призводить до помилок в оцінюванні перспектив промислової рудоносності цих об'єктів, що знецінює результати проведених робіт і аж ніяк не сприяє ентузіазму інвесторів.

Аналіз попередніх досліджень. Тим часом інтерес до цих проявів у потенційних інвесторів існує. Зацікавленість ними у свій час виявляли компанії США, Канади, Франції, Іспанії, Китаю, Кореї, Польщі (*Куваев*, 2009; *Медный голод...*, 2007; *Харченко*, 2011; *Корея будет добывать...*, 2008). У 1997 р. компанія "Polska Miedz" (Польща) купила пакет документації на ділянку Жиричі, а у 2007 р. Волинською обласною радою було погоджено дозвіл спільному українсько-польському підприємству "Укрполмідь" на використання надр на прояві Жиричі (*Укрполмеди*

разрешили..., 2007; *Жижара*, 2007). На жаль, соціально-політичні чинники завадили розвитку цього проекту.

Однак інтерес до проявів самородної міді Волинського рудного району не знизився. З 1991 по 2008 рр. Рівненська геологічна експедиція ПДРГП "Північгеологія" проводить геологорозвідувальні роботи на території Волинського рудного району (*Пошуки родовищ міді...*, 2008), які включали пошукові роботи на ділянках Жиричі, Заліси-Шменьки, Північно-Гірницька, Північно-Ратнівська, Ратнівська, Текля, Тельча, Кухотсько-Вольська, Велико-Мідська; пошуково-оцінювальні – у межах Південно-Рафалівського рудопояву. Велика частина цих робіт була присвячена вивченню рудопояву Жиричі, де було виділено п'ять продуктивних горизонтів (1А, 2А, 2Б, 3А, 3Б). За замовленням ПДРГП "Північгеологія" ТОВ "СЛТ Союз" за матеріалами ГРП виконало техніко-економічне міркування доцільності проведення пошуково-оцінювальних робіт на самородну мідь у межах Жирицького рудопояву. Були розраховані попередні кондиції, підраховані прогнозні ресурси іді у кількості 992,83 тис. т (у т. ч. категорія P_1 – 858,93 тис. т; P_2 – 133,9 тис. т) і прогнозні ресурси благородних елементів (Au – 8,14 т, Ag – 700,58 т, Pt – 7,85 т, Pd – 2,62 т).

У 2016 р. комунальне підприємство "Волиньприродресурс" отримало спецдозвіл на видобуток міді (*Кравчук*, 2017). За його замовленням виробничим кооперативом "Геолог" було проведено попереднє геолого-економічне оцінювання прояву Жиричі (*Попередня геолого-економічна...*, 2016). Були оцінені запаси міді за категорією C_2 – 72,2 тис. т, прогнозні ресурси категорії P_1 – 720,55 тис. т і P_2 – 109,45 тис. т; встановлені запаси благородних металів категорії C_2 (Au – 0,60 т; Ag – 51,33 т; Pt – 0,61 т; Pd – 0,20 т) і ресурси категорії P_{1+2} (Au – 6,81 т; Ag – 585,98 т; Pt – 0,66 т; Pd – 0,22 т), розраховані основні техніко-економічні показники освоєння ділянки Жиричі, які, на думку авторів звіту, підтвердили економічну ефективність ймовірної експлуатації. Це стало основою

© Михайлов В., Курило М., Андрєєва О., Шнюков С., 2022

для початку пошуково-оцінювальних робіт КП "Волинь-природресурс" на прояві Жиричі.

Виділення нерозв'язаних частин загальної проблеми. Проблема полягає у тому, що дві свердловини, пробурені КП "Волинь-природресурс", за результатами геолого-економічного оцінювання прояву Жиричі не підтвердили наявності рудних тіл у підрахункових блоках, що ставить під сумнів результати геолого-економічного оцінювання рудопояву загалом, включно із підрахунком запасів і ресурсів міді.

Формулювання цілей статті. Основною ціллю статті є об'єктивне геолого-економічне оцінювання прояву Жиричі. Для цього нами проведено детальний аналіз фактичного матеріалу геологорозвідувальних робіт на ділянці Жиричі, викладеного у вищепоіменованих звітах (*Пошуки родовищ міді...*, 2008; *Попередня геолого-економічна...*, 2016), здійснено перерахунок запасів і прогнозних ресурсів прояву і розраховані основні техніко-економічні показники його освоєння.

Виклад основного матеріалу. Під час проведення ГРП на рудопояві Жиричі на площі 36,4 км² пробурено 53 свердловини (23850 пог. м), що дозволило досягнути щільності бурової мережі 1600 × 600–800 м із згущенням на окремих профілях до 800 × 800 м. Було виділено 5 продуктивних горизонтів (знизу): 1А, 2А, 2Б, 3А, 3Б, представлених переважно базальтами, рідше – туфами (2А) з мідною мінералізацією, протяжність яких, на думку авторів звіту (*Пошуки родовищ міді...*, 2008), сягає 4–5 км, а площа – перших десятків квадратних кілометрів, у межах яких виділяються окремі рудні тіла зі вмістом міді ≥ 0,2 % на товщину ≥ 1 м. Глибина залягання рудних горизонтів становить 164–530 м. Середні потужності та середній вміст самородної міді по рудних тілах горизонтів становлять: 1А – 5,7 м і 0,27 %, 2А – 2,23 м і 0,42 %, 2Б – 1,73 м і 0,45 %, 3А – 1,26 м і 0,3 %, 3Б – 1,78 м і 0,32 %. Зазначається, що горизонти 2А і 2Б за товщиною рудних тіл і вмістом міді в них є найбільш стабільними.

Установлено, що руди добре збагачуються за гравітаційно-флотаційною схемою збагачення, мідь є виключно чистою, вміщує до 99,9 % металу. Крім того, в міді присутні: Au – до 8,2 г/т; Ag – до 706,0 г/т, а в руді – платина – до 0,027 г/т та паладій – до 0,009 г/т. Рудні тіла оконтурені за бортовим вмістом 0,2, 0,3 і 0,4 % міді. Були розраховані попередні кондиції для найсприятливішого з економічної погляду варіанту: бортовий вміст міді – 0,2 %, мінімальна потужність рудного тіла – 1,0 м, максимальна потужність прошарків пустих порід і некондиційних руд – 1,0 м; підраховані прогнозні ресурси міді у кількості 992,83 тис. т (у т. ч. категорія Р₁ – 858,93 тис. т; Р₂ – 133,9 тис. т) із середнім вмістом міді 0,379 % потужністю рудних тіл 1,26–5,7 м. Крім того, були підраховані прогнозні ресурси благородних елементів, які за варіантом бортового вмісту міді 0,2 % склали: Au – 8,14 т, Ag – 700,58 т, Pt – 7,85 т, Pd – 2,62 т.

У звіті (*Попередня геолого-економічна...*, 2016), підготовленому за матеріалами ГРП, встановлені такі кондиції: бортовий вміст міді – 0,2 %; мінімальний промисловий вміст міді в підрахунковому блоці – 0,313 %; мінімальна потужність рудного тіла – 1,0 м; максимальна потужність прошарків порожніх порід і некондиційних руд, яка включається в підрахунок запасів – 2,0 м. На основі цих кондицій були оцінені запаси за категорією С₂ (окремі блоки горизонтів 2А і 2Б) у кількості 72,2 тис. т міді, а також прогнозні ресурси категорії Р₁ (горизонти 3Б, 3А, 2Б, 2А) у кількості 720,55 тис. т міді і Р₂ (горизонт 1А) у кількості 109,45 тис. т міді. Крім того, для благородно-металевого зруденіння були встановлені запаси категорії С₂ (Au – 0,60 т;

Ag – 51,33 т; Pt – 0,61 т; Pd – 0,20 т) і ресурси категорії Р₁₊₂ (Au – 6,81 т; Ag – 585,98 т; Pt – 0,66 т; Pd – 0,22 т).

Родовище віднесено до третьої групи складності геологічної будови, до якої належать родовища або ділянки дуже складної геологічної будови з рудними тілами, які представлені середніми і невеликими за розміром ліноподібними, пластовидними і жилородними покладами із змінною потужністю і невтриманим вмістом міді, а також невеликими стовпоподібними і штокоподібними тілами дуже складної будови, сильно розгалуженими, ліноподібними метасоматичними покладами і жилами із вельми нерівномірним розподілом міді.

Переважно висновки авторів цього звіту, їхня оцінка запасів і ресурсів мідних руд ділянки Жиричі, заключення про економічну ефективність імовірної експлуатації були підтримані на засіданні колегії Державної комісії України по запасах корисних копалин при Державній службі геології та надр України (*протокол № 3769, 2016*).

Розглянемо, наскільки висновки цих звітів відповідають наявному фактичному матеріалу.

Одним із головних оціночних критеріїв ступеня вивчення рудних об'єктів є щільність мережі гірничих виробок, у цьому випадку – свердловин. Як уже зазначалося, щільність бурової мережі на площі прояву Жиричі становила 1600 × 600–800 м із згущенням на окремих профілях до 800 × 800 м (рис. 1). Реальна відстань між свердловинами на ділянці підрахунків запасів категорії С₂ становить від 400 до 1400 м. Чи достатня така щільність для підрахунку запасів категорії С₂?

В українських інструктивних матеріалах не існує вимог до щільності розвідувальної мережі свердловин при підрахунку запасів категорії С₂, але ще з радянських часів така мережа встановлена для підрахунку запасів категорії С₁. Вона становить 50–70 м для 3-ї групи (за складністю геологічної будови) родовищ міді, до якої віднесений рудопояв Жиричі. Згідно з (*Методические рекомендации...*, 2007), для підрахунку запасів категорії С₂ 3-ї групи родовищ міді розвідувальна сітка порівняно із сіткою для категорії С₁ розріджується у 2–4 рази залежно від особливостей геологічної будови родовища. Щільність розвідувальних свердловин для підрахунку запасів категорії С₁ передбачена на рівні 50–70 м, тобто для підрахунку запасів категорії С₂ відстань між свердловинами не має перевищувати 100–280 м. Таким чином, якщо дотримуватися цих методичних рекомендацій (які є абсолютно логічними і доцільними), то підрахунок запасів категорії С₂ на ділянці Жиричі є недостовірним.

Не менш важливим для обґрунтування ресурсів рудних об'єктів є визначення особливостей їх геологічної будови, геолого-промислового типу зруденіння, форми і розміру рудних тіл.

Рудопояв Жиричі належить до вкрай рідкісного самородномідного геолого-промислового типу мідного зруденіння, представленого у світі родовищами ледь не єдиного міднорудного району озера Верхнього. Там родовища самородної міді (Copper Harbor, Eagle Harbor, Eagle River, Mohawk, Calumet, Hancock, Houghton, Ontonagon) приурочені до північного сектору вузької (10–15 км) трогоподібної структури, складеної базальтами серед осадових порід, витягнутої в північно-східному напрямку на понад 250 км (*Laurel et al.*, 2020). Мінералізація приурочена до верхніх мигдалекам'яних частин базальтових лавових пластів і конгломератів серії Портдж-Лейк пізньодокембрієського віку. Рудні зони завтовшки до 3–5 м достатньо витримані та простежуються по простяганню на 1,5–11,0 км, а по падінню – на 1,5–2,6 км (*Borngorst, Barron*, 2011). Самородна мідь

утворює дрібні зерна і самородки в порах у цементі брекчій і конгломератів, середній вміст міді в рудних тілах коливається від 0,8 до 2,8 %, руди мають підвищений вміст срібла. Вага самородків може сягати 19 т

(*Borngorst, Barron, 2017*). Вік мідної мінералізації становить 1060–1047±20 млн р. Загальні запаси міді сягали 6 млн т, за час розробки родовищ із 1844 р. тут видобуто до 5,5 млн т міді.

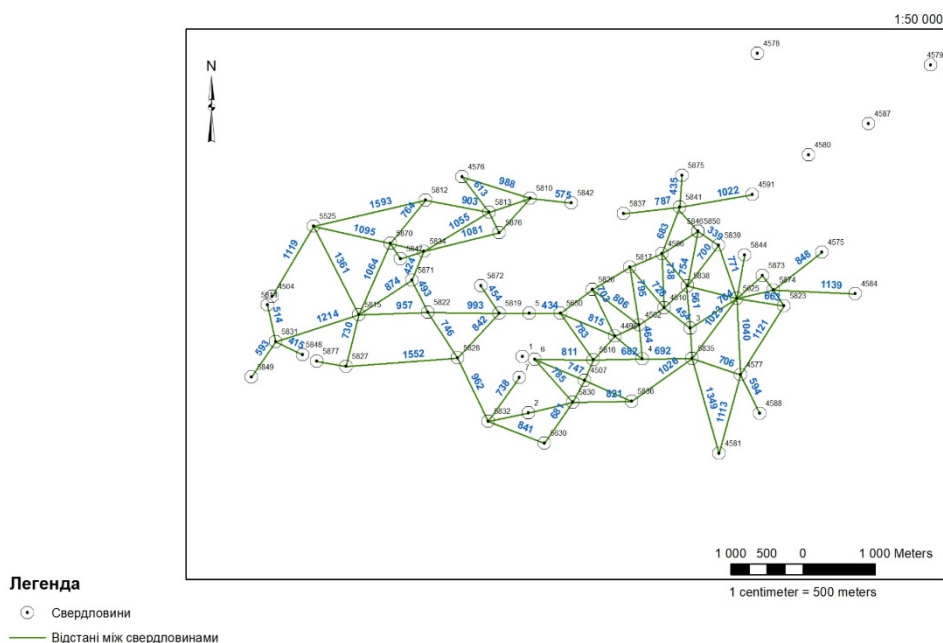


Рис. 1. Схема розміщення свердловин і відстані між ними

Рудопрояв Жиричі суттєво відрізняється від родовищ міднорудного району озера Верхнього за масштабами, вмістом корисних компонентів і будовою рудних тіл. Як впливає з результатів критичного аналізу фактичних матеріалів ГРР (*Пошуки родовищ міді...*, 2008; *Попередня геолого-економічна...*, 2016), анонсована в них значна горизонтальна протяжність рудних тіл, які за товщини 1–3 метри витягуються на кілька кілометрів (до 4–5 км), викликає значні сумніви. Принаймні можна сказати, що це не обґрунтовано наявним фактичним матеріалом. Скоріш за все рудні тіла представлені лінзами невеликої протяжності (перші десятки, можливо до перших сотень метрів), які зазвичай приурочені до певних стратиграфічних горизонтів, але можуть з'являтися і в будь-якій частині розрізу вулканогенної товщі.

Наведемо кілька прикладів некоректної інтерпретації фактичного матеріалу. Так, на розрізі II–II Додатку 7 до звіту (*Пошуки родовищ міді...*, 2008) і аналогічному розрізі II–II Додатку 10 до звіту (*Попередня геолого-економічна...*, 2016) свердловинами 5650 і 4510 розкриті кондиційні перерізи рудних тіл горизонту 2Б потужністю у першому випадку 1,0 м і вмістом міді 0,41 %, у другому – 1,4 м/0,27 % (рис. 2). Відстань між свердловинами становить 1430 м. І ось тонесенький прошарок завтовшки біля 1 м автори звітів витягують на майже 1,5 км. І це без урахування того, що і в свердловині 4510, і в розміщеній найближче на півдні до цього профілю свердловині 4502 перерізи рудного тіла мають умовно кондиційний характер, тому що в обидвох випадках у підрахунок включалися некондиційні значення вмісту міді. До цього можна додати, що у свердловині 5826, розміщеній найближче до лінії розрізу з північної сторони (300 м), рудні тіла цього горизонту взагалі не виявлені.

Ще цікавіше виглядає ситуація з горизонтом 3Б на тому самому розрізі. Він розкритий в одному перерізі свердловиною 5650 (товщина 1,0 м, вміст міді 0,22 %), в іншому – свердловиною 4510 (1,0 м і 0,27 % міді) і у

трьох перерізах – свердловиною 5625 (1,1 м/0,35 %; 1,2 м/0,26 %; 1,4 м/0,31 %). Але ж між першою і другою свердловинами відстань становить 1430 м, між другою і третьою – 1000 м. Тим не менш автори не тільки протягують цей тонесенький прошарок на відстань понад 2000 м, але й різко збільшують його товщину в проміжку між свердловинами 4510 і 5625. Безумовно, це є штучним збільшенням параметрів рудних тіл.

Другою загальною помилкою (якщо це помилка) авторів звітів із ГРР є систематичне порушення ними ж установлених кондицій підрахунку, а саме бортового вмісту міді 0,2 %, мінімальної потужності рудного тіла 1,0 м, максимальної потужності прошарків порожніх порід і некондиційних руд – 1,0 м.

Наведемо типовий приклад. По свердловині 5838 виділений рудний інтервал 343,4–344,7 м, тобто 1,3 м завтовшки із середнім вмістом міді 0,38 %. На перший погляд, це відповідає прийнятим кондиціям. Але з усього цього інтервалу тільки інтервал 343,9–344,2, тобто 0,3 м, є рудним із високою концентрацією міді (1,6 %). Автори штучно доводять товщину рудного тіла до кондиційної, включаючи безрудні інтервали 343,4–343,9 м (0,5 м) і 344,2–344,7 м (0,5 м) із кларковими вмістами міді (0,01 %). Безумовно, цей інтервал треба виключити з підрахунку запасів як такий, що не відповідає кондиціям. На жаль, таких прикладів багато. Таким чином, кількість і товщину рудних інтервалів треба переглянути в бік зменшення.

Інша помилка авторів звітів, що аналізуються, пов'язана із визначенням площі підрахункових блоків. На наш погляд, автори не виправдано збільшили їхню площу за рахунок включення до підрахункового блоку безрудних свердловин чи свердловин з некондиційними параметрами, а також не виправдані інтерполяції площі рудних тіл на території, де відсутні будь-які дані. Отже, і площі підрахунку запасів мають бути переглянуті в бік зменшення.

Таким чином, ресурси в сотні тисяч тон міді та запаси в десятки тисяч тон у звітах про проведення ГРР є

необґрунтованими. Відповідно всі техніко-економічні показники освоєння ділянки Жиричі, розраховані в цих звітах, не мають реального підґрунтя.

Після детального аналізу особливостей геологічної будови рудопояву, просторового розповсюдження, форми і розмірів рудних тіл, результатів аналізу відібраних проб ми дійшли висновку про некоректність підрахунку запасів категорії С₂ і прогнозних ресурсів категорії Р₁ у межах ділянки Жиричі. Це обумовлено невитриманістю рудних тіл у просторі та в розрізі, недостатньою щільністю гірничих виробок, порушенням установлених кондицій під час підрахунку запасів. На цій стадії ГРП виділення в межах рудопояву блоку рудних тіл, ступінь геологічного вивчення яких дозволяє класифікувати запаси за категорією С₂, є некоректним.

Ураховуючи вищесказане, нами проведене переоцінювання прогнозних ресурсів категорії Р₁ у межах ділянок, де в результаті проведених робіт виокремилися перспективні площі, підтверджені наявністю продуктивних інтервалів з кондиційними показниками в розрізі певних свердловин. Контури підрахунку прогнозних ресурсів категорії Р₁ наведені на рис. 3. Вони складають невеликі (0,1–1,0 км²) просторово розрізнені площі, які переважно опираються на результати поодиноких свердловин (горизонти 3Б, 3А, 1А, частково – 2Б і 2А), і тільки для горизонтів 2Б і 2А у центральній частині рудопояву Жиричі виокремлюються більш-менш значні (до 2–3 км²) площі. Параметри цих площ і оцінка прогнозних ресурсів категорії Р₁ наведені в табл. 1.

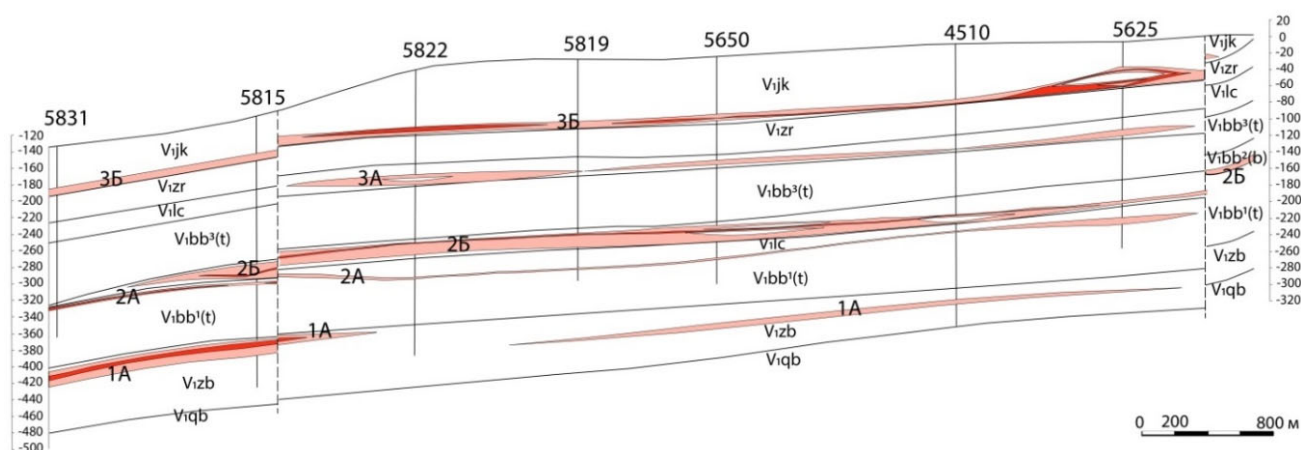


Рис. 2. Фрагмент розрізу II-II по лінії свердловин рудопояву Жиричі (Пошуки родовищ міді..., 2008; Попередня геолого-економічна ..., 2016)

Схема свердловин та перспективних ділянок за горизонтами

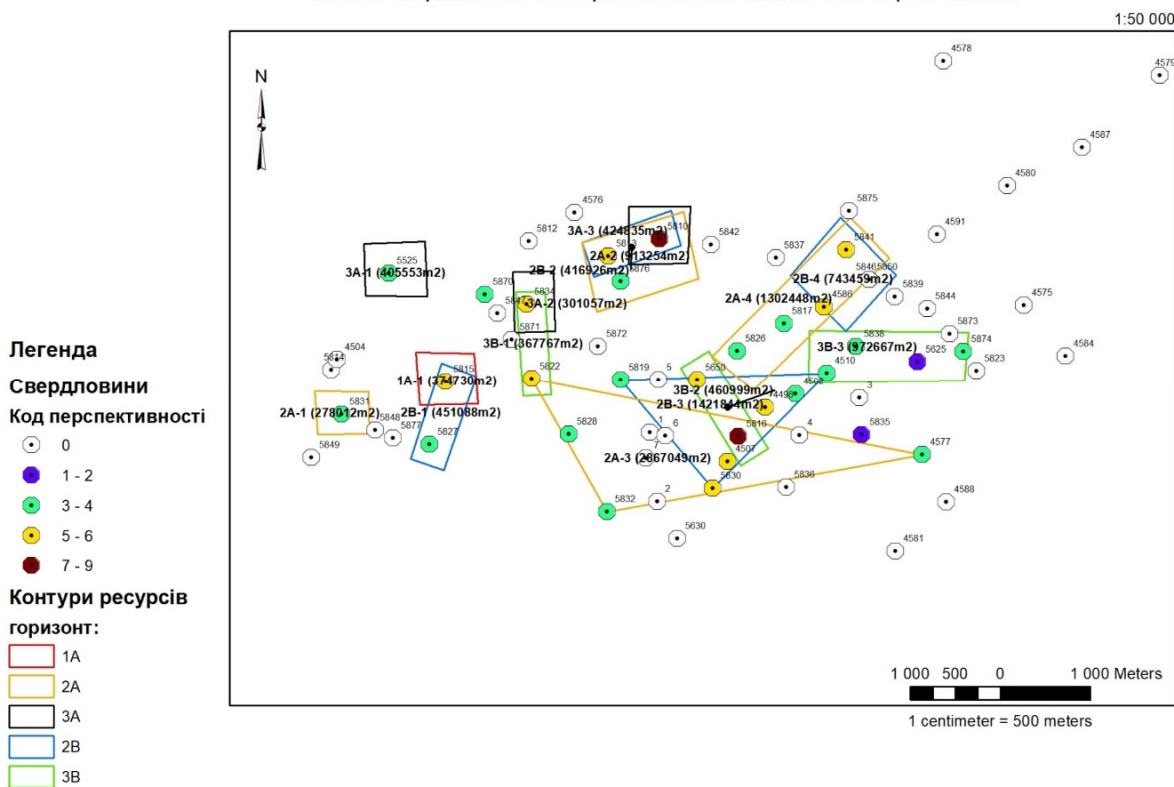


Рис. 3. Контури оцінювання перспективних ресурсів категорії Р₁

Таблиця 1

Розрахунок перспективних ресурсів категорії Р₁ рудопрояву Жиричі

№ св.	Інтервал	Товщина, м	Вміст міді, %	Прогнозні ресурси, тис. т	
				Руди	Міді
Горизонт 3Б-1 (площа 0,38 км²)					
5834	295,3–297,0	1,7	0,19		
5822	274,7–278,2	3,5	0,50		
	Усього/Середнє	2,6	0,40	2470	9,9
Горизонт 3Б-2 (площа 0,46 км²)					
5650	258,0–259,0	1,0	0,22		
5816	258,0–259,0	1,0	0,21		
	Усього/Середнє	1,0	0,22	1150	2,5
Горизонт 3Б-3 (площа 0,97 км²)					
4510	238,2–239,2	1,0	0,27		
5838	211,2–212,2	1,0	0,22		
5625	217,1–218,5	1,4	0,31		
5874	164,0–168,0	4,0	0,40		
	Усього/Середнє	1,85	0,36	4486	16,1
Горизонт 3А-1 (площа 0,40 км²)					
5525	372,3–374,5	2,2	0,32	2200	7,0
Горизонт 3А-2 (площа 0,30 км²)					
5834	359,0–360,0	1,0	0,44	750	3,3
Горизонт 3А-3 (площа 0,42 км²)					
5810	266,0–267,0	1,0	0,28	1050	2,9
Горизонт 2Б-1 (площа 0,45 км²)					
5827	424,1–425,2	1,1	2,01		
	437,5–439,5	2,0	0,34		
5815	447,6–449,0	1,4	1,00		
	Усього/Середнє	1,5	0,95	1687	16,0
Горизонт 2Б-2 (площа 0,42 км²)					
5813	449,5–450,5	1,0	0,63		
5810	353,3–355,2	1,9	0,46		
	Усього/Середнє	1,45	0,52	1522	7,9
Горизонт 2Б-3 (площа 1,42 км²)					
5819	397,6–398,6	1,0	0,21		
5830	389,7–390,7	1,0	0,88		
4507	388,7–389,7	1,0	0,22		
5816	384,5–390,0	5,5	0,44		
4498	390,3–391,8	1,5	0,31		
5650	393,7–394,7	1,0	0,28		
4502	364,8–366,2	1,4	0,19		
4510	372,3–373,7	1,4	0,27		
	Усього/Середнє	1,7	0,37	6035	22,3
Горизонт 2Б-4 (площа 0,79 км²)					
4586	344,7–345,6	1,7	0,22		
5846	249,2–250,5	1,3	0,38		
5841	221,3–222,6	1,3	0,36		
	Усього/Середнє	1,4	0,31	2765	8,6
Горизонт 2А-1 (площа 0,28 км²)					
5831	488,6–490,3	1,7	1,04	1190	12,4
Горизонт 2А-2 (площа 0,91 км²)					
5810	379,0–380,0	1,0	0,75		
5813	481,9–483,0	1,1	0,88		
5876	460,8–461,8	1,0	0,21		
	Усього/Середнє	1,0	0,62	2275	14,1
Горизонт 2А-3 (площа 2,86 км²)					
5830	434,8–436,8	2,0	0,72		
4507	425,1–429,9	5,0	0,21		
5816	413,3–416,1	2,8	0,40		
4577	366,0–367,7	1,7	0,27		
5832	408,5–409,5	1,0	0,29		
5828	431,7–432,7	1,0	0,48		
5822	456,2–458,0	1,8	0,75		
	Усього/Середнє	2,2	0,40	15730	62,9
Горизонт 2А-4 (площа 1,30 км²)					
5826	409,9–413,2	3,3	0,31		
5817	410,0–411,0	1,0	0,21		
	414,5–415,5	1,5	0,50		
4586	372,5–375,5	3,0	0,28		
5841	275,1–276,1	1,0	0,29		
	Усього/Середнє	2,0	0,32	6500	20,8
Горизонт 1А (площа 0,37 км²)					
5815	531,5–537,2	5,7	0,26	5272	13,7
	ЗАГАЛОМ			55082	220,4

Таким чином, за нашими розрахунками прогнозні ресурси міді категорії P_1 ділянки Жиричі становлять 220,4 тис. т міді, що в чотири рази менше, ніж наведено у відповідних матеріалах ГРР (*Пошуки родовищ...*, 2008: 858,93 тис. т; *Попередня геолого-економічна...*, 2016: C_2 – 72,2 тис. т, P_1 – 720,55 тис. т, разом 792,75 тис. т).

Що стосується ресурсів благородних елементів (срібла, золота, платини і паладію), як у межах запасів категорії C_2 , так і в межах ресурсів категорії P_{1+2} , їх треба виключити з підрахунку ресурсів як недостовірні. Справа в тому, що вміст срібла в межах рудних тіл за результатами аналізу кернових проб у звіті (*Пошуки родовищ...*, 2008, *Додаток Ю*) ніде не перевищує кларкові значення, а часто і не досягає них. Щодо золота, то у звіті (*Пошуки родовищ...*, 2008, *Додаток ЗД, 7Д*) по ділянці Жиричі наводяться дані спектроскопометричних аналізів 13 кернових проб, з яких ні в одній пробі не встановлено підвищеного вмісту золота. Вміст золота зазвичай становить менше 0,005 г/т, інколи – до 0,05 г/т. В деяких пробах були зафіксовані підвищені вмісти золота (до 0,1–1,0 г/т), але повторний аналіз цих проб не підтвердив його підвищеного вмісту. Що стосується платиноїдів, у представлених матеріалах взагалі відсутні будь-які дані, які б підтверджували їх наявність.

Для визначення доцільності проведення наступних ГРР та можливого промислового значення для встановлених перспективних ресурсів були проведені укрупнені техніко-економічні розрахунки, які базувались на основних положеннях освоєння ділянки Жиричі відповідно до опублікованих матеріалів (*Повідомлення про планову діяльність...*, н.д.). Родовище рекомендовано розробляти підземним способом із максимальною продуктивністю по видобутку руди 400 тис. т. Планується будівництво гірничо-збагачувального комбінату, який матиме єдиний комплекс підсобно-допоміжних цехів і виробництв. Товарною продукцією ГЗК приймається мідний концентрат із вмістом міді 81,2 %, який далі піддається

металургійному переробленню на одному з металургійних заводів України.

До початку промислового освоєння родовища передбачено проведення розвідки із затвердженням промислових категорій запасів із обґрунтуванням технологічної схеми перероблення руд, на підставі чого буде виконане детальне геолого-економічне оцінювання родовища, опрацьовані параметри кондицій, кількісні та якісні показники концентратів. Згідно із попередніми оцінками рекомендовано гравітаційну схему збагачення, яка включає електричну та магнітну сепарації.

Треба зазначити, що в попередньому оцінюванні запасів і ресурсів прийнято надзвичайно оптимістичні технологічні параметри, зокрема мідний концентрат із вмістом міді 81,2 % із вилученням 80,4 %. Більшість мідних концентратів, які потрапляють зараз на ринок, містять 20–40 % міді, тому тут техніко-економічні розрахунки базуються не на обсягах і якості концентрату, а на кількості металу, який вилучається при видобутку і переробленні. Такий підхід дає більш об'єктивну оцінку можливого прибутку.

Дані продуктивності по видобутку і виробництву продукції наведено в табл. 2.

Узагальнена структура капіталовкладень для майбутнього освоєння ресурсів наведена на рис. 4. Їх обсяги за аналогією з іншими об'єктами на стадії розроблення становитимуть 100–120 млн \$. Собівартість виробництва мідного концентрату за укрупненими розрахунками може бути у межах 22–25 млн \$/рік, при цьому в її структурі більше 50 % буде припадати на підземний видобуток із закладкою виробленого простору.

Головним показником, який буде визначати доцільність проведення ГРР та промислового освоєння ділянки, є ціна на метал і відповідні концентрати. У 2021 р. ціна на мідь сягала 10500 \$/т, але зазнавала значних коливань, не опускаючись нижче 8000 \$/т (рис. 5).

Таблиця 2

Дані продуктивності по видобутку і виробництву продукції		
№	Найменування показників	Значення
1	Перспективні ресурси, тис. т	55082
2	Вміст Cu, %	0,40
3	Втрати, %	7,0
4	Ресурси з урахуванням втрат і засмічення 10 %, тис. т	56918,1
5	Видобувні обсяги ресурсів, тис. т	56918,1
6	Продуктивність видобування руди, тис. т	400–1000
7	Термін забезпеченості запасами, роки	60,00
8	Максимальна продуктивність, тис. т	1000
9	Вилучення металу при збагаченні, %	80,4
10	Кількість Cu, яка вилучається (за максимальної продуктивності), тис. т/рік	3,22



Рис. 4. Узагальнена структура капіталовкладень для майбутнього освоєння ресурсів (частка %)



Рис. 5. Динаміка цін на мідь у 2021 р. за даними Лондонської біржі металів

Для визначення рентабельності промислового освоєння ресурсів міді ділянки Жиричі використані можливі варіанти цін: базова ціна 8000 \$/т, можливе зростання до 10000 і 12000 \$/т (табл. 3).

Треба зазначити, що мінімальний промисловий вміст для всієї ділянки має граничні значення щодо фактичного зафіксованого, що потребує детального обґрунтування

для кожного підрахункового блоку. У табл. 4 наведені значення мінімального промислового вмісту міді для окремих горизонтів із визначенням можливого промислового значення. На цьому етапі вивчення встановити промислове значення об'єкта неможливо, оскільки багато параметрів оцінювання потребують уточнення та/або приймалися за аналогією.

Таблиця 3

Рентабельність освоєння ресурсів міді ділянки Жиричі

Показник ефективності	ціна на Cu, \$/т			
	7000	8000	10000	12000
Рентабельність по валовому прибутку	≈1 %	13 %	38 %	63 %
Рентабельність по чистому прибутку	≈1 %	10 %	31 %	51 %

Таблиця 4

Мінімальний промисловий вміст по окремих горизонтах

Горизонт	Площа, км ²	Вміст Cu, %	Мінімальний промисловий вміст Cu, %	Можливе промислове значення
ЗБ-1	0.38	0.4	0.40	+
ЗБ-2	0.46	0.22	0.72	-
ЗБ-3	0.97	0.36	0.44	+/-
ЗА-1	0.40	0.32	0.50	-
ЗА-2	0.30	0.44	0.36	+
ЗА-3	0.42	0.28	0.57	-
ЗБ-1	0.45	0.95	0.17	+
ЗБ-2	0.42	0.52	0.31	+
ЗБ-3	1.42	0.37	0.43	+/-
ЗБ-4	0.79	0.31	0.51	-
ЗА-1	0.28	1.04	0.15	-
ЗА-2	0.91	0.62	0.26	+
ЗА-3	2.86	0.4	0.40	+
ЗА-4	1.30	0.32	0.50	-
1А	0.37	0.26	0.61	-

Важливим доповненням до промислового значення зазначеного об'єкта може бути його комплексність. Наведені розрахунки базуються лише на видобутку і виробництві мідних концентратів. Врахування можливого вилучення благородних металів може поліпшити ефективність відпрацювання родовища на 5–15 %, але потребує додаткових технологічних досліджень.

Висновки. Таким чином, на основі аналізу матеріалів геологорозвідувальних робіт на прояві міді Жиричі Волинського рудного району проведено його геолого-економічне переоцінювання, у тому числі здійснено перерахунок запасів і прогнозних ресурсів прояву. Як з'ясувалося, у процесі ГРП запаси і прогнозні ресурси прояву були штучно суттєво завищені, що вводить в оману потенційних інвесторів. Це сталося насамперед завдяки помилковій інтерпретації геологічної будови родовища, форми і розміру рудних тіл. Зокрема, викликає великі

сумніви анонсована в матеріалах ГРП значна горизонтальна протяжність рудних тіл, які за товщини 1–3 м простягаються на кілька кілометрів (до 4–5 км). На наш погляд, вони представлені переважно лінзоподібними тілами порівняно невеликої протяжності (від перших десятків до перших сотень метрів). За нашими розрахунками прогнозні ресурси міді категорії Р₁ становлять 220,4 тис. т, що в чотири рази менше, ніж наведено у відповідних матеріалах ГРП. Що стосується запасів міді категорії С₂, а також прогнозних ресурсів благородних металів, то вони мають бути виключені з підрахунку як необґрунтовані та недостовірні. Здійснений підрахунок техніко-економічних показників освоєння рудопрояву Жиричі свідчить про слабку економічну ефективність його ймовірної експлуатації, що має враховуватися під час розгляду щодо вкладення інвестицій у цей об'єкт.

Список використаних джерел

- Жижара, Р. (2007). На Волині розробляють медне месторождение. *Gazeta.ua*. Отримано з https://gazeta.ua/ru/articles/lviv-newspaper/_na-volyni-razrabatyvayut-mednoe-mestorozhdenie/153796?mobile=true
- Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року. (2011). *Інформаційне агентство "ЛІГА:ЗАКОН"*. Отримано з http://search.ligazakon.ua/_doc2.nsf/link1/JF5OG00V.html
- Корея будет добывать медь и уран в Украине. (2008). *Корейский культурный центр*. Отримано з <http://koreancenter.org.ua/?p=1135>
- Кравчук, Н. (2017). Волинь має мільйони тонн самородної міді! *Високий замок*. Отримано з <https://wz.lviv.ua/article/210005-volyn-maie-miliony-tonn-samorodnoi-midi>
- Куваев, С. (2009). Большая медь. *Укррудпром*. Отримано з http://www.ukrudprom.com/analytics/Bolshaya_med.html?print
- Медный голод. Польские магнаты нашли сырье на Волини. (2007). *Dsnews*. Отримано з <https://www.dsnews.ua/politics/art30337>
- Гурский, Д.С., Есипчук, К.Ю., Калинин, В.І. (Ред.) (2006). Металічні та неметалічні корисні копалини України. Т. 1. Металічні корисні копалини. Київ-Львів: "Центр Європи".
- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Медные руды. (2007). Москва: ФГУ ГКЗ. Отримано з <http://amurinform.ru/wp-content/uploads/2015/10/met.rek.-mednye-rudy.pdf>
- Мінеральні ресурси України. (2018). К: Геоінформ України. Отримано з http://geoinf.kiev.ua/M_R_2018_1.pdf
- Перспективы развития медной промышленности в Украине (2011). *ЗБС полпред*, № 369017. Отримано з https://polpred.com/?ns=1&ns_id=369017
- Повідомлення про планову діяльність, яка підлягає оцінці впливу на довкілля комунального підприємства "Волинприродресурс" Волинської обласної ради. (н.д.). Отримано з <http://eia.menr.gov.ua/uploads/documents/656/reports/a361a74887b9033dc967ed118cd14721.pdf>
- Попередня геолого-економічна оцінка ділянки мідних руд Жиричі у Ратнівському районі Волинської області. Звіт про пошуково-оцінювальні роботи. (2016). *Звіт про НДР*. ВК "Геолог".
- Пошуки родовищ міді в межах рудопроявів Волинського рудного району і пошуково-оцінювальні роботи на Рафалівській площі. (2008). *Звіт про НДР*. ПДРГП "Північгеологія".
- Укрполімеді разрешили разрабатывать месторождение меди в Украине. (2007). *Газета по-українськи*. Отримано з <http://www.infogeo.ru/metals/news/?act=show&news=22595>
- Харченко, А. (2011). Кто заработает на украинской меди? *delo.ua*. Отримано з <https://investgazeta.delo.ua/kompanii-i-rynki/kto-zarabotaet-na-ukrainskoj-273142/> [in Russian]
- Bornhorst, T.J., Barron, R.J. (2011). Copper deposits of the western Upper Peninsula of Michigan. In Miller, J.D., Hudak, G.J., Wittkop, C., and McLaughlin, P.I. (Eds.) *Geological Society of America Field Guide*, 24, 83–99. [https://doi.org/10.1130/2011.0024\(05\)](https://doi.org/10.1130/2011.0024(05)).
- Bornhorst, T.J., Barron, R.J. (2017). Discovery and geology of the Guinness world record Lake Copper, Lake Superior, Michigan. *A.E. Seaman Mineral Museum*, Web Publication 2, 8 p. Retrieved from https://museum.mtu.edu/sites/default/files/2019-11/ASEMM_Web_Pub_2_Lake_Copper_2017.pdf
- Laurel, G., Klaus, J. Suzanne, W., Connie, L. (2020). Mineral deposits of the Mesoproterozoic Midcontinent Rift system in the Lake Superior region – A space and time classification. *Ore Geology Reviews*, V. 126. Отримано з https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136820301761?dgci=d=rss_sd_all
- Trading summary. (2021). *London Metal Exchange*. Отримано з <https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/LME-Copper#Price>
- V. Mykhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vladvam@gmail.com;
M. Kurilo, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: kurilo@mail.univ.kiev.ua;
O. Andreeva, PhD (Geol.), Researcher,
E-mail: andreeva_ea@ukr.net;
S. Shnyukov, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: shnyukov54@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

References

- Bornhorst, T.J., Barron, R.J. (2011). Copper deposits of the western Upper Peninsula of Michigan. In Miller, J.D., Hudak, G.J., Wittkop, C., and McLaughlin, P.I. (Eds.) *Geological Society of America Field Guide*, 24, 83–99. [https://doi.org/10.1130/2011.0024\(05\)](https://doi.org/10.1130/2011.0024(05)).
- Bornhorst, T.J., Barron, R.J. (2017). Discovery and geology of the Guinness world record Lake Copper, Lake Superior, Michigan. *A.E. Seaman Mineral Museum*, Web Publication 2, 8 p. Retrieved from https://museum.mtu.edu/sites/default/files/2019-11/ASEMM_Web_Pub_2_Lake_Copper_2017.pdf
- Harchenko, A. (2011). Kto zarabotaet na ukrainskoj medi? *delo.ua*. Retrieved from <https://investgazeta.delo.ua/kompanii-i-rynki/kto-zarabotaet-na-ukrainskoj-273142/> [in Russian]
- Koreya budet dobyvat' med' i uran v Ukraine. (2008). *Korejskij Kul'turnyj Centr*. Retrieved from <http://koreancenter.org.ua/?p=1135> [in Russian]
- Kravchuk, N. (2017). Volyn maie miliony tonn samorodnoi midi! *Vysoki zamok*. Retrieved from <https://wz.lviv.ua/article/210005-volyn-maie-miliony-tonn-samorodnoi-midi> [in Ukrainian]
- Kuvaev, S. (2009). Bol'shaya med'. *Ukrudprom*. Retrieved from http://www.ukrudprom.com/analytics/Bolshaya_med.html?print [in Russian]
- Laurel, G., Klaus, J. Suzanne, W., Connie, L. (2020). Mineral deposits of the Mesoproterozoic Midcontinent Rift system in the Lake Superior region – A space and time classification. *Ore Geology Reviews*, V. 126. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136820301761?dgci=d=rss_sd_all
- Mednyj golod. Pol'skie magnaty nashli syr'e na Volyni. (2007). *Dsnews*. Retrieved from <https://www.dsnews.ua/politics/art30337> [in Russian]
- Hurskyi, D.S., Esypchuk, K.Yu., Kalinin, V.I. (Eds.) (2006). Metalichni ta nemetalichni korysni kopalyny Ukrainy. Tom 1. Metalichni korysni kopalyny. Kyiv-Lviv: "Tsentr Evropy". [in Ukrainian]
- Metodicheskie rekomendacii po primeneniyu Klassifikacii zapasov mestorozhdenij i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Mednye rudy. (2007). Moskva: FGU GKZ. Retrieved from <http://amurinform.ru/wp-content/uploads/2015/10/met.rek.-mednye-rudy.pdf> [in Russian]
- Mineralni resursy Ukrainy. (2018). K: Heoinform Ukrainy. Retrieved from http://geoinf.kiev.ua/M_R_2018_1.pdf [in Ukrainian]
- Perspektivy razvitiya mednoj promyshlennosti v Ukraine. (2011). *ZBС polpred*, № 369017. Retrieved from https://polpred.com/?ns=1&ns_id=369017 [in Russian]
- Poperednia heoloho-ekonomichna otsinka dilianky midnykh rud Zhyrychi u Ratnivskomu raioni Volynskoi oblasti. Zvit pro poshukovo-otsiniuvalni roboty. (2016). *Zvit pro NDR*. VK "Heoloh". [in Ukrainian]
- Poshuky rodovyskh midi v mezhakh rudoproyaviv Volynskoho rudnogo raionu i poshukovo-otsiniuvalni roboty na Rafalivskii ploshchi. (2008). *Zvit pro NDR*. PDRHP "Pivnichheolohiia". [in Ukrainian]
- Povidomlennia pro planovu dialnist, yaka pidliahaie otsinti vplyvu na dovkillia komunalnogo pidpriemstva "Volynpryrodresurs" Volynskoi oblasnoi rady. (n.d.). Retrieved from <http://eia.menr.gov.ua/uploads/documents/656/reports/a361a74887b9033dc967ed118cd14721.pdf> [in Ukrainian]
- Trading summary. (2021). *London Metal Exchange*. Retrieved from <https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/LME-Copper#Price>
- Ukrpolmedi razreshili razrabatyvat' mestorozhdenie medi v Ukraine. (2007). *Hazeta po-ukrainsky*. Retrieved from <http://www.infogeo.ru/metals/news/?act=show&news=22595> [in Russian]
- Zhizhara, R. (2007). Na Volyni razrabatyvayut mednoe mestorozhdenie. *Gazeta.ua*. Retrieved from https://gazeta.ua/ru/articles/lviv-newspaper/_na-volyni-razrabatyvayut-mednoe-mestorozhdenie/153796?mobile=true [in Russian]
- Zahalnodержавна prohrama rozvytku mineralno-syrovynnoi bazy Ukrainy na period do 2030 roku. (2011). *Informatsiine ahentstvo "LIHA:ZAKON"*. Retrieved from http://search.ligazakon.ua/_doc2.nsf/link1/JF5OG00V.html [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 19.01.22

PROSPECTS OF INDUSTRIAL ORE-BEARING OF ZHYRYCHI ORE OCCURRENCE

Based on the analysis of geological exploration materials, geological and economic reassessment of the copper ore occurrence in Zhyrychi (Volyn ore region) was carried out, including the recalculation of reserves and unproved resources. As it turned out, during the exploration process, the reserves and unproved resources were significantly exaggerated, which misleads potential investors. This was primarily due to the wrong interpretation of the geological structure of the deposit, shape and size of ore bodies. The considerable horizontal length of ore bodies, which at a thickness of 1–3 m extend for several kilometers (up to 4–5 km), raises great doubts. In our view, they are represented mainly by lenticular bodies of relatively short length (the first tens up to the first hundreds of meters). According to our calculations, the unproved resources of copper of category P_1 are 220.4 thousand tons, which is four times smaller than in the relevant exploration materials. Reserves of copper of category C_2 and the unproved resources of precious metals should be excluded from the calculation as unreasonable and unreliable. The calculation of technical and economic indicators of copper-ore occurrence in Zhyrychi indicates the weak economic efficiency of its probable operation, which should be taken into account when considering investing in this object.

Keywords: copper, Zhyrychi ore occurrence, reserves, unproved resources, geological and economic assessment.

UDC 553.2(477.64)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.10>L. Datsenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: liudmyla.datsenko@tsatu.edu.ua;

M. Hanchuk, Cand. Sci. (Agr.),

E-mail: ganchukmn@gmail.com;

Yu. Chebanova, Cand. Sci. (Geogr.),

E-mail: yuliia.chebanova@tsatu.edu.ua;

S. Malyuta, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,

E-mail: serhii.maliuta@tsatu.edu.ua;

O. Mazykina, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,

E-mail: gavrich17@gmail.com;Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University,
18 B. Khmelnytsky Ave., Melitopol, 72312, Ukraine

POLOGIVSKIY KAOLIN DEPOSIT: GEOLOGY, MINERAL AND CHEMICAL COMPOSITION, TECHNOLOGICAL PROPERTIES

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О. М. Іванік)

The area of the Pologivskiy deposit of kaolins and refractory clays is located on the border of two geological regions: the Azov crystalline massif and the Konkso-Yalynska depression. Precambrian crystalline rocks and sediments of the Cretaceous, Paleogene, Neogene, and Quaternary systems take part in the geological structure of the district. The geological structure of the district is based on the results of field exploration (23–25) and geological surveying works. Deposits of the Quaternary system are widespread in the territory and are similar to mantle on the underlying rocks. The lower border of the Quaternary system is formed at the base of the Berezanskiy climatolite in accordance with the Geological Map of Ukraine legend (the scale 1:200 000) of the 1996 Central Ukrainian series. The underlying rocks are red-brown Pliocene clays in most parts of the territory, in the rest there are rocks of crystalline basement of Cretaceous, Paleogene and Neogene systems.

The thickness of the Quaternary deposits is 10–20 m. Deposits of the Novopetrivska Neogene suite are productive for the extraction of clays and kaolins, in the base of which the undivided deposits of the Upper Eocene (Kyivska suite) and Oligocene (Kharkivska suite) lie. These are coastal-marine deposits – marls, calcareous clays, siltstones, weakly cemented sandstones and glauconite quartz sands. The total thickness of the Kyivska and Kharkivska suites varies from 0,0 to 60–70 m. Clays and kaolins are characterized by almost the same mineral composition. Most of them are composed of fine-grained kaolinite, and quartz predominates among impurities. Accessory and ore minerals are represented by zircon, rutile, ilmenite and hematite. Quartz is present in clays and kaolins in the form of rolled, semi-rolled and unrolled grains. High-quality aluminosilicate products are obtained from the kaolins of the deposit. Pologivskiy kaolin can be used to make chamotte without the clay addition, as well as a binder. The ratio of chamotte and binder is 80–20 %. The refractories obtained in the laboratory meet the requirements of high density for Class A blast furnace bricks and other products of appropriate determination. Pologivskiy clays are recognized as suitable for the production of 100 % refractories, as well as a binder component instead of Chasov-Yarska clays. Products made entirely of semi-acid clay meet the requirements for semi-acid refractory products of class B. Pologivskiy kaolins and clays have long been used in refractory, machine-building, ceramic, cement and other industries.

Keywords: kaolin, Pologivskiy deposit, geology, stratigraphy, mineral, chemical composition of kaolin and clays, technological properties.

Problem setting. Kaolin (primary and secondary), refractory clays are a complex raw material used by many industries. Secondary kaolins, as well as refractory clays, are used for the production of high-alumina, chamotte and semi-acidic products and non-formed materials (mortars, masses, concretes, powders). Regarding this, the discovery of the Pologivskiy deposit of kaolins and clays at the beginning of the 20th century (developed by locals since 1929) had to be the reason for the lower cost of high-alumina, chamotte and semi-acid products and non-formed materials production. However, in the late 1980s and early 1990s, the economic and political situation in the former Soviet Union did not contribute to the development and exploration of deposits of construction raw materials in southern Ukraine (North-Western, Eastern Pryazovie). The south of Ukraine was planned to be used exclusively for recreational and medical purposes, which could lead Ukraine to economic dependence. After Ukraine gained independence (1991), in the 1990s the authorities did not pay enough attention to the development of the raw material base, especially in the south. Geological exploration expeditions (Bilozerska Geological Party (Mykhailivka, Zaporizhzhia region), Pryazovska GEE (Volnovakha, Donetsk region) conducted research of Zaporizhzhia region, Pryazovie on their own and discovered ore bodies of iron ore deposits, related deposits, etc.

The authors of the article (L.M. Datsenko) cooperated with these institutions in the terms of stratigraphic studies of the Meso-Cenozoic cover in connection with the work on the

Geomap – 200, the implementation of research projects, financed by the state budget, from the early 2000s to 2014 (Datsenko, 2014; Datsenko et al., 2020). We believe that the obtained data on minerals and raw materials base of the south of Ukraine have not only scientific but also economic significance, especially at the present stage of the state development.

Nowadays there are no unified requirements for the quality of secondary kaolins, due to the fact that the compound and the physical and ceramic properties of kaolins from different deposits are not the same and vary widely. Chemical composition and fire resistance are primarily used as classification criteria in assessing the quality of secondary kaolins. Depending on the chemical composition, fire resistance, and in some cases the content of coarse-grained or sandy particles, secondary kaolins are divided into different varieties at each deposit.

Analysis of recent publications. Analysis of scientific publications of foreign scientists shows that almost all studies of kaolin deposits aim to establish their economic potential and suitability for industrial processing. This focus of research is due to high demand for raw materials.

The data processing of the world geological community in relation to kaolin deposits in Russian Federation (Ivanov et al., 2019; Grishin et al., 2017), Nigeria (Adagunodo et al., 2018; Oyebanjo et al., 2018; Akinsunmade et al., 2019), China (Fang et al., 2019), Iran (Zirjanizadeh et al., 2018; Abedini, Rezaei Azizi, 2019), Ethiopia (Bedassa et al., 2019), Algeria (Laraba, 2019), South Africa (Raphalalani et al.,

2019), Malaysia (Hussin et al., 2018), Cameroon (Nzeukou Nzeugang et al., 2018), Turkey (Yanik et al., 2018), Egypt (Awad et al., 2018; Saber et al., 2018).), Japan (Jige et al., 2018) showed that the kaolin ores of the Pologivskiy deposit have higher geological and economic indicators, the study of which is a further goal for the authors research. The results of geological research of the Pologivskiy deposit of kaolins and clays have been published in scientific journals for the first time.

Research materials and methods. The authors of the article worked with the drill cores, made stratigraphic conclusions, took part in laboratory work on the basis of the Pryazovska geological exploration expedition in the testing shop. Until 2014, chemical and mineralogical analyzes were performed in the laboratory of the Pryazovska GEE, and since 2015 in the chemical laboratory and research geotechnical laboratory of TSATU (Melitopol). The authors had the opportunity to work with the stock materials of the expedition, geological reports, for which they are sincerely grateful to the staff of the Pryazovska GEE. Scientific materials on tectonics, stratigraphy of the deposit were kindly provided by the staff of the Pryazovska GEE, in particular by the leading geologist I.L. Kniazkova.

Testing occupies an important place in the complex of works on studying the quality of minerals, contouring of ore bodies and calculation of the useful components reserves. Sampling was carried out during the field works and was based on the tasks set by the technical assessment. All exploration and production wells drilled within the deposit were tested.

All intervals that revealed minerals (kaolins, refractory clays) were drill core tested for ordinary, group and laboratory-technological sampling. In addition, opencast rocks and bedrock rocks were tested. Samples were taken for chemical, mineralogical, physico-mechanical, ceramic and technological studies.

Taking into account the tasks and the specifics of the mineral, the test interval ranged: for secondary kaolins from 0,5 to 1,3 m, averaging 1,1 m, for refractory clays from 0,2 to 1,6 m, averaging 1,2 m. Before testing, the drill core was cleaned from drilling mud and clay solution. In the process of deposit exploration ordinary samples were taken from the drill core of the wells by splitting the core along the long axis into 2 parts manually, one of which was used as a sample, the other one as a duplicate. In the process of drilling production wells, all the drill core material was sampled.

In order to clarify the geological structure of the deposit, to study the chemical, mineralogical, grain size distribution and ceramic features of the overburden and underlying rocks, ordinary drill core samples were taken. Based on the peculiarities of the geological structure of the deposit, samples were taken for supra-kaolin sands (sand-clay mixture), loams and clays, the average length of the sample was 1,5–2,0 m. Chemical analyzes were performed to determine the content of the main limiting components in the mineral and host rocks of the Pologivskiy deposit.

Chemical analyzes of ordinary kaolin samples were performed on Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 . Chemical analysis for SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 was performed in 20 % of ordinary samples.

Topographic and geodetic support of geological exploration works. Topographic and geodetic works related to the creation of a reference and survey base and topographic surveys were performed on the territory of the Pologivskiy deposit. The reference geodetic network consists of points of the state planning and height basis, geodetic condensation networks and is created according to

the requirements of the corresponding Instructions. The density of the geodetic basis ensures the performance of topographic surveys in compliance with the requirements of the regulatory documents. Thus, since 1939 to 1949, the survey was carried out on a scale of 1:25 000, then – 1:10 000 (1953), 1:5 000 (1972). Today the area is covered by topographic surveys at a scale of 1:2 000. The works were performed by the traverse survey service of Mining Company "Mineral" LLC in the 1942 state coordinate system of and the Baltic Altitude System (Shpylchak et al., 1999).

To determine the planned coordinates of exploration wells, the method of intersection and resection at the side length from 1,5 to 3 km, the polar method and the laying of theodolite traverses through the wells were used. On all exploration stages planned and high-altitude reference of the wells was performed up to triangulation points of III and IV classes (1939–1972), as well as to polygonometry points.

The coordinates of the wells in the intersection were determined by at least 3 starting points, in the resection – by at least 4 starting points, respectively. The angles at the determined points of the intersection and resection ranged from 30° to 150°.

The coordinates of the wells were calculated twice with different choice combinations of the starting points. The final coordinate was the average of the two values, provided that the distance between them did not exceed $\pm 1\text{m}$. Horizontal angles in theodolite traverses and intersections were measured by the TH theodolite using limb permutations between modes and half-modes by an angle of about 90°. The lengths of the lines while theodolite traversing were measured with 20-meter steel tape in the forward and back directions. If the angles of inclination of lines was above 2°, the corresponding corrections for an inclination were made into the length of measurements.

The height marks of the well were determined by the method of geometric leveling in the Baltic altitude system.

During the operational works control referencing of the wells are selectively carried out by the services of Mining Company "Mineral" LLC. Errors in coordinates at the same time do not exceed admissible values of the Instruction requirements.

The topographic basis was adjusted by Mining Company "Mineral" LLC as of January 1, 2020 (Shpylchak et al., 1999).

Results and discussion. General information about the deposit. Administratively, the deposit is located in Pologivskiy district of Zaporizhzhia region, 0,5 km west of Pologivskiy. The area of the field is 667 hectares (Fig. 1).

The considered area is a lowland plain, sloping to the north-northwest. The surface of the plain is cut by rivers and ravines. The direction of watersheds and river valleys is mainly north-western. The main features of the orography of the area are mainly caused by its geological structure. Within the outputs to the day surface of the crystalline rocks of the Pryazovskiy crystalline massif, the surface relief is more dissected, with absolute marks of 180–200 m. In places of development of a thick layer of loose deposits (Konksko-Yalynska depression) on the contrary, the relief is more plain, almost flat with marks of watershed plateaus of 120–140 m. The main water artery of the district is the Konka River, a left tributary of the Dnipro River. The Konka River starts within the Pryazovskiy crystalline massif, in the form of two rivers of Sukha and Mokra Konka. In the highlands they are strongly branched, have narrow valleys (300–500 m) with rather steep, sometimes rocky shores. North of the Kinski Rozdory (village) at the confluence of Sukha and Mokra Konka the Konka River is formed. In the

zone of development of loose deposits the river valley becomes wider up to 1,0 km, and takes an asymmetrical structure. The right slope is higher and steeper, cut by numerous deep ravines. There are many outcrops of native

rocks both on the slope of the valley and in the ravines. Markings of the bottom of the Konka River valley vary from 120 m in the Kinsky Rozdory village up to 65 m near the village of Novo-Karlivka.



 Pologivskiy deposit of kaolins and refractory clays
Fig. 1. Overview map of the work area. Scale 1:200 000

In the nature of the ravines and gullies slopes of the district there is the following pattern: the right slopes of the ravines and gullies to the left from the Konka River are more gentle, often made of ravine deluvium, while the left slopes of the ravines to the right from the Konka River, are on contrary, more gentle and made by ravine deluvium. These features in the structure of the ravine and gullies slopes are caused by the general slope of the surface to the northwest.

There are no deluvial deposits on the right bank of the Konka River, and Neogene rocks are exposed almost throughout the bank.

The first floodplain terrace can be traced along the entire Pologivskiy deposit. The width of the terrace is 200–800 m, the height is 4,0–6,0 m. The ledges of the terrace are weakly expressed in the relief. The surface of the terrace rises gently away from the river. Its marks range from 100 to 120 m. There is a slight rise above it towards the watershed, but the higher terraces in relief are not expressed. They were discovered while drilling. The total width of the terraces is 1,0–1,2 km, the height above the river level of the 2nd floodplain terrace is 10–15 m and the 3rd is 20–30 m. The marks are 120–130 m. The bareness of the area is weak, mainly quarries for sand, clay and kaolin.

Geological structure. The area of the Pologivskiy deposit of kaolins and refractory clays is located on the border of two geological regions (Fig. 2): the Pryazovskiy crystalline massif and the Konksko-Yalynska depression. Precambrian crystalline rocks and sedimentary deposits of the Cretaceous, Paleogene, Neogene, and Quaternary systems take part in the geological structure of the district. The geological structure of the district is described according

to the results of deposit exploration (23–25) and geological surveying works (Shpilchak et al., 1999).

Geologically and structurally, the Pologivskiy area is located on the western wing of the Konksko-Yalynska depression. It is filled with deposits of the Lower and Upper Cretaceous, as well as Paleogene and Neogene. The bottom, composed of Precambrian rocks, has a slope to the south. Judging by the nature of sedimentary rocks, the depression deposition took place in the early Cretaceous. The area of the plots is characterized by a two-storey geological structure.

The lower structural floor is a complex dislocated crystalline foundation of the Ukrainian Shield, in the structure of which there are non-stratified ultrametamorphic, intrusive and metasomatic formations of archaean and Proterozoic.

The upper structural floor is the Phanerozoic deposits of the platform cover of the Mesozoic and Cenozoic. The latter includes the Meso-Cenozoic and Quaternary layers. Meso-Cenozoic deposits are represented by clays, sands, sandstones, argillites, siltstones, limestones, marls, crucibles, kaolins of Cretaceous, Paleogene and Neogene age.

Quaternary deposits are represented by black soils, loams, sands, clays. They are distributed in river valleys, where they form the alluvium of riverbeds and the first floodplain terraces. In addition, they completely cover the older Meso-Cenozoic formations and the crystalline basement.

Stratigraphy. Mesozoic eretema within surveyed area is represented by Cretaceous deposits. The formation of the chalk system in the search area is represented by the lower and upper divisions. In the lower part, a clay-sand bundle (K₁gp) and a Lunacharska suite (K₁ln) are mapped.

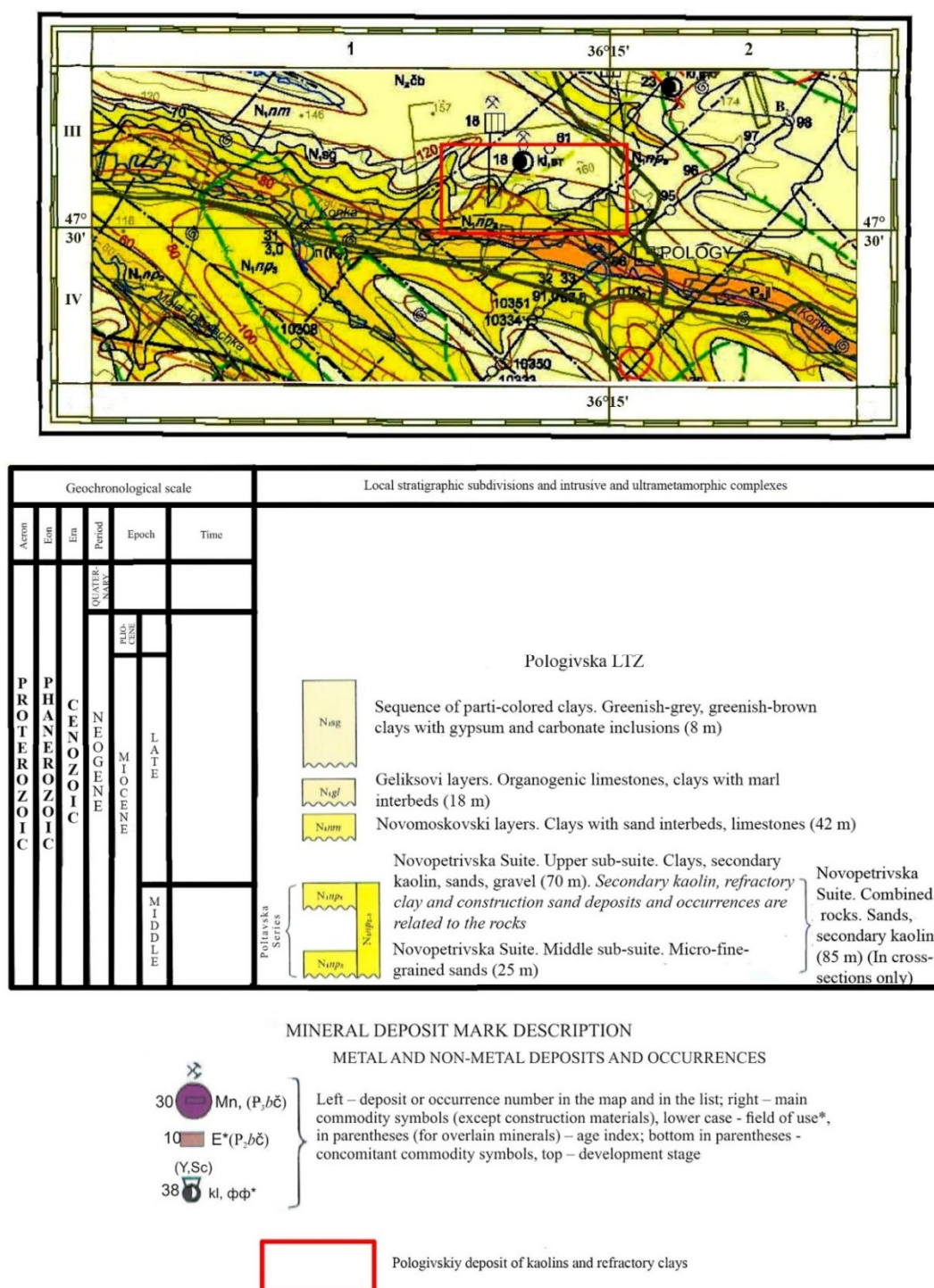


Fig. 2. Schematic geological map of pre-Quaternary formations of the deposit

The area of distribution of clay-sand bundle deposits is controlled by the position of buried erosion-tectonic valleys in the crystalline basement. The bundle is composed of multi-grained sands, siltstones and coal clays, secondary kaolins, brown coal lenses (up to 0,2 m). At the base of the layer there are small pebble and gravel formations. The crystalline rocks are fragmentary represented. The thickness of the bundle does not exceed 20 m. The bundle is covered by the Lunacharska suite. The area of distribution of coastal-marine deposits of the Lunacharska suite is controlled by negative forms of the pre-mezozoic relief. The suite is composed of quartz-glaucinite sands and

sandstones, cruciform rocks with gravel and pebbles at the base of the thickness, rarely clays. The thickness of the suite is up to 25 m. It is overlapped by the Oleksandrivska suite.

The Genichesk (K₂gn) and Oleksandrivska (K₂ol) suites are mapped in the lower part of the cross-section.

The suite is almost horizontal with a slight slope (less than 5°) towards the Black Sea basin. The Henichesk suite overlaps with the stratigraphic inconsistencies with the Oleksandrivska suite.

The Oleksandrivska suite is spread over the entire area of the deposit. In the lower part of the cross-section it is composed of marls, often chalky, which contain glauconite, less often

sandstone. Its thickness is up to 15 m. On the marls, sandstones on clay-siliceous cement with belemnite rosters, quartz-glaucinite and carbonate sands are found respectively. The age of the suite is the Late Campanian, Maastrichtian.

Within the search area, the Cenozoic eratema is represented by deposits of the Paleogene, Neogene and Quaternary systems. The deposits of the Paleogene system are widespread on the deposit area. They occur with angular and stratigraphic inconsistencies on the eroded surface of the

crystalline basement and rocks of the Cretaceous system. They are presented by the Oligocene division (Lower subdivision: Rupelian layer, Mezhyvska layer, Kharkivska series).

Yalynska sequence (3jl) is distributed within the south-eastern part of the district, in the form of a wide (up to 7 km) strip (Fig. 3). The surface of the deposits is inclined to the north and north-west. The outputs of the sequence to the day surface were recorded in the area of Pologivskiy.

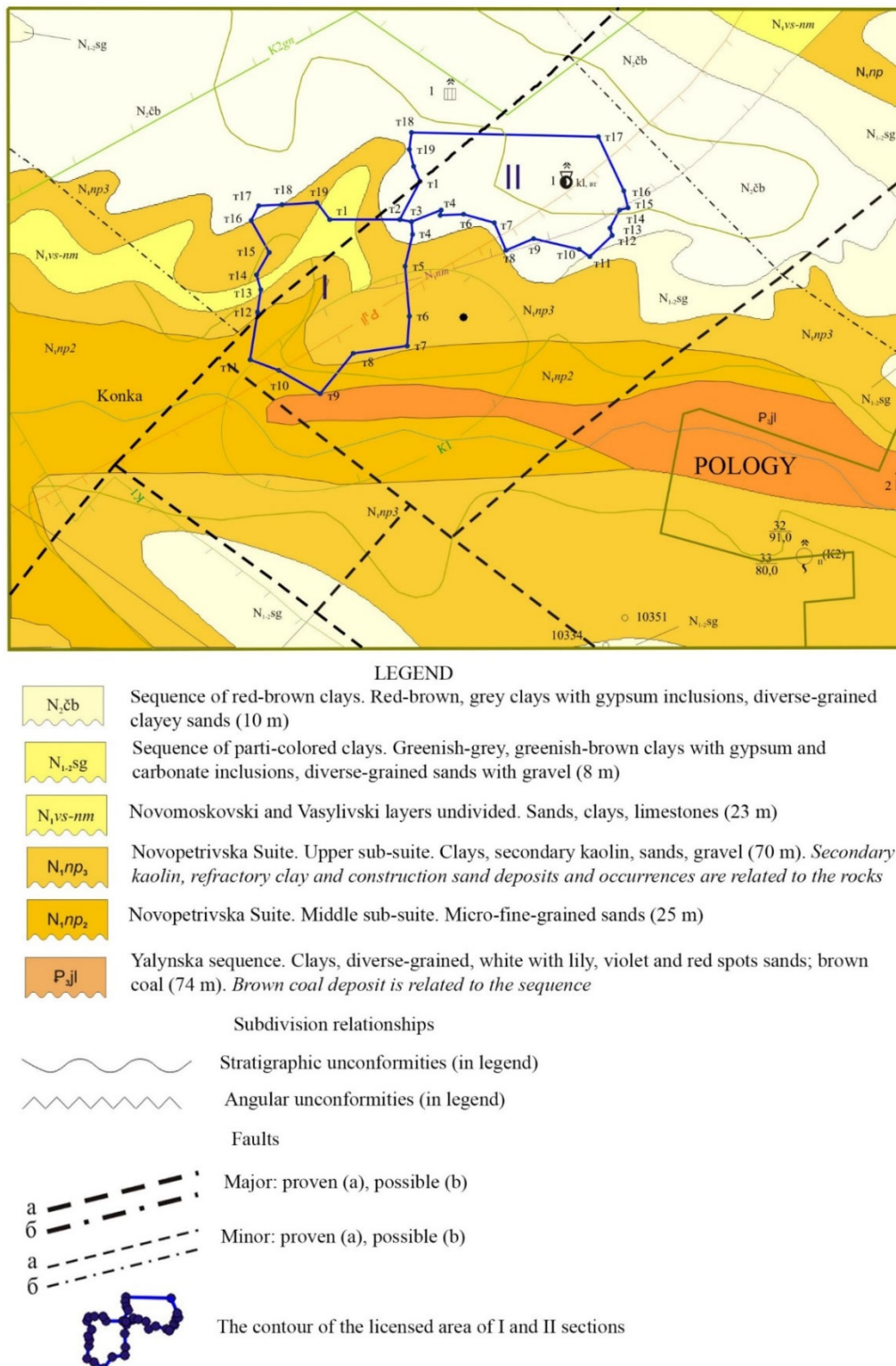


Fig. 3. Schematic geological map of the Pologivskiy deposit area

In the section of the sequence there is a complex layering of sands, sandstones, clays, secondary kaolins with the remains of charred plants. The clays of the upper part are thicker than kaolinite, the lower ones are hydromica with an admixture of beidelite and kaolinite. The transitions between the layers are gradual, sometimes the contacts are sharp, at an angle of 45° to the horizon. The Early Oligocene age of the Yalynska sequence formations is established on the basis of their occurrence on the rocks of the Reshetelivska sequence of the late Eocene and the history of the geological development of the region.

As part of the Neogene system, the formation of the Miocene and Pliocene divisions is distinguished. The Miocene division within the sheets is represented mainly by the middle and upper subdivisions. As part of the middle subdivision on the surveyed territory, the middle and upper sub-suite of the Novopetrivska suite are distinguished (represented by the Poltavka series). The Poltavka series (N_{1pl}) is represented only by the middle and upper sub-suites of the Novopetrivska suite. The Novopetrivska suite (middle sub-suite – N_{1pl}) in terms of position in the cross-section of the middle sub-suite of the Novopetrivska suite corresponds to the deposits of the Chokrakskiy layer, which are multifacial the same age formations of a common sea basin.

The rocks of the sub-suite are developed in the central part of the deposit (Fig. 3). The distribution boundary is complex, winding, outlines the deep erosion of sedimentary rocks over time. Their surface is inclined in the south-western direction, decreasing from +80 m to 20 m in absolute height. They are represented by coastal-marine deposits, which occur with stratigraphic inconsistency on the Paleogene and crystalline basement rocks. They are overlapping with deposits of the upper sub-suite of the Novopetrivska suite. Lithologically, they are represented by white homogeneous, well-sorted quartz, with an admixture of feldspar, sands with sponge spicules. The sands are fine-grained. In the sand cover strong, porous, cellular, fine-grained sandstones are often found on siliceous cement. The thickness of sandstones is 0,5–1,5 m, the thickness of the suite is 25 m.

The deposits of the sub-suite are exposed along the valley of the Konka River to the north-west of the town of Pologivskiy (Fig. 2), where organic remains *Dentatum* sp., *Cardium* sp., *Loripes* sp., *Chlamys* sp have been found.

Continental deposits of the upper sub-suite with stratigraphic inconsistency occur on Paleogene and Miocene rocks, and in places of their absence – with angular and stratigraphic inconsistency on the formations of the crystalline basement. They overlap with deposits of the Upper Miocene, and in places of their absence – with rocks of the Pliocene and Quaternary system. They are absent on elevated areas of the crystalline basement and in river valleys. The surface of the deposits is inclined to the north and north-west.

The formations of the upper sub-suite are represented by a complicated complex of different genetic type rocks of the coastal lowland plain – multi-grained kaolin sands with gravel, secondary kaolins, clays, coal clays with layers of brown coal. Deposits lie between faunistically characterized by Middle and Upper Miocene rocks. They are represented by continental deposits formed in the Karahan-konskiy time. The thickness of the upper sub-suite of the Novopetrivska sub-suite reaches 70 m.

On the territory of the deposit, the upper subdivision is mainly represented by marine deposits of the Sarmatian and Pontic layers. Continental rocks of variegated clay layers,

which cover the full century interval of the subdivision, are also widespread.

Marine deposits of the Sarmatian layer are slightly spread here. The most complete section of the layers is represented by the middle layer, which corresponds to the Novomoskovskiy and Vasylivkiy undivided layers.

The middle layers (Novomoskovskiy and Vasylivskiy layers are undivided – N_{1nm-vs}) – deposits occupy the north-western part of the surveyed area (Fig. 2–3). They are found with erosion and stratigraphic inconsistency on the rocks of the Novopetrivska suite. They are overlain by faunistically characterized rocks of the Pontic layer and red-brown Pliocene clays. The lithological composition of shallow marine deposits is represented by sands, montmorillonite clays, organogenic-detrital limestones and pelitomorphous marls. Sandy deposits are widespread, bordering the protrusions of the crystalline massif. Clay rocks occupy the central areas of distribution. Clays are from dark gray to black, at the top gradually change colour to green, thin-leaved due to siltstone layers, fine-grained sand (less than sm) or shell detritus.

Pontic layer (variegated clays layer- N_{1sg}) – deposits of variegated clays layers are distributed over the most part of the territory. They occur with stratigraphic inconsistency on the rocks of the Poltava series, Sarmatian and Pontic layers. They are covered with a layer of reddish-brown clay. The clays are greenish-gray, with numerous spots of ocher, brown and cherry-red colours, with gypsum druse, marly contractions, iron-manganese lumps, in the lower part of the cross-section they are often ashy-gray, gray with inhomogeneous mechanical composition. The thickness of the motley clays layer is 2–4 m, sometimes up to 8 m. Redeposited radiolarians and spicules of siliceous sponges are found among the organic residues in the layer.

Pliocene deposits include subaerial formations of watershed plateaus and subaquatic deposits of ancient river terraces, which stand out as undivided deposits of red-brown clay (N_{2čb}). Deposits of red-brown clays with stratigraphic inconsistency occur on Miocene rocks (motley clays layer). In elevated areas they are found on the rocks of the crystalline basement with angular and stratigraphic inconsistencies. They are absent in river valleys and large ravines, where they were eroded in the Quaternary season. They are overlain by the deposits of the Quaternary system, with which they are connected by gradual transitions. The thickness of the layer reaches 11 cm.

The red-brown clays are represented by dense non-stratified varieties, almost without an admixture of clastic material. The content of the <0,05 fraction mm is 96–99 %. The clays which were composed by montmorillonite and beidelite are characterized by sliding mirrors on which black dendritic films of manganese hydroxides are developed. Iron-manganese oolites, 2–3 mm in diameter, are quite common. Calcareous contractions and gypsum are contained in different quantities and found at the lower part of the cross-section. The size of concretions reaches 30 cm in diameter. Gypsum occurs in the form of single crystals and rubble and does not form significant accumulations. The hardness and fragments of crystalline rocks are found in places where clays occur on the rocks of the crystalline basement, in the lower parts of the cross-section.

In the cross-section of the layer there are two horizons, which correspond to the Siverskiy and Beregovskiy climatolites. Lower, Siverskiy is represented by gray, dark gray clay with brownish, often with greenish hues, and is carbonate and gypsum. Clays are characterized by an increased content of sand and silt fractions in comparison with

the comprising strata. In the gamma-ray charts, the horizon is characterized by a decrease in the radioactivity of the rocks and stands out quite clearly. Clays belong to the aeolian-deluvial genetic type. The thickness is 4–6 m. The upper one, Beregovskiy, is represented by fossil soil – red-brown, dense red-brown, non-stratified carbonate clays. The drying cracks, 0,5–2 cm wide, filled with dark gray material of Berezanskiy climatolite, are rarely observed. The shape of the cracks is wedge-shaped, their surface is uneven. They penetrate to the depth of 50–70 cm. Horizon thickness is 2–6 m.

Deposits of the Quaternary system are widespread in the territory and are similar to mantle on the underlying rocks. The lower limit of the Quaternary system is formed at the base of the Berezanskiy climatolite in accordance with the Geological Map of Ukraine legend (the scale 1:200 000) of the 1996 Central Ukrainian series. The underlying rocks are red-brown Pliocene clays on the most parts of the territory, on the rest there are rocks of crystalline basement of Cretaceous, Paleogene and Neogene systems.

The thickness of the Quaternary deposits is 10–20 m.

The Quaternary continental cover belongs to the forest formation of the off-glacial zone. There are two groups of facies: subaerial (forests and loess-like loams, which are interbedded with fossil soils) and subaquatic (alluvial strata) deposits. Lithologically subaerial layer is not sustained both in area and in cross-section. In the lower parts of the cross-section, crushed stone and gravel of crystalline rocks are often found.

In the south-western part of the area, hearth deposits of eluvial, aeolian-deluvial and lake genesis take part in the formation of the layer.

Continental subaquatic Quaternary deposits are represented by alluvial pebbles, conglomerates, sands, sandstones, clays and loams of terrace deposits of river valleys, expressed in relief or buried. The straton, that is mapped, is taken as the degree.

Deluvial deposits are confined to the slopes of rivers and ravines.

The Pleistocene and Holocene are distinguished as part of the Quaternary system. Pleistocene consists of lower, middle and upper divisions. The lower one is represented by the Eopleistocene section, the middle and upper ones by the Neopleistocene section.

Non-stratified formations. Archaea (AR), paleoarchaea (Dniester) – intrusive and ultrametamorphic formations of the paleoarchaea are combined into Novopavlivskiy mafic-ultramafic and Novopavlivskiy granitoid complexes. In order to prevent misunderstandings, and taking into account the same name of Novopavlivski complexes, they are assigned the first and second numbers, respectively.

The vast majority of non-stratified formations of the district were formed in Archean times during three eons. Among them there are both ultrametamorphic and intrusive complexes, and ultrametamorphic processes prevailed at the Paleo-mesoarchean stage of the area development. Meso-neo-Archaic neo-Archaic are already characterized by the predominant development of intrusive rocks. The final stage of formation of the Paleoeoarchean granulite complex was accompanied by the introduction of intrusions of the gabbro-peridotite formation and ultrametamorphism, in the process of which granitoids of the enderbit-diorite-tonalite formation were formed. The first corresponds to the Novopavlivskiy mafic-ultramafic complex (AR_{1np1}), the second to the granitoid of the same name (AR_{1np2}).

Novopavlivskiy mafic-ultramafic complex (AR_{1np1}) – intrusive formations of the complex are confined mainly to the ancient sublatitudinal Prakonska fault zone. Bodies

occur in the form of xenoliths, schlers and lenses among the granitoids of the Novopavlivskiy-2 complex. Rocks are tectonized, degenerated, amphibolized, converted into amphibolites, actinolites, crystalline shales and gneisses. Intrusive bodies are ranging in size from 0,46 km² to 2 km² and are deformed and differently oriented. They participate in folding. The complex is represented mainly by rocks of the main composition such as gabbro, gabbro-amphibolites and apogabric amphibolites. Gabroid rocks are closely related, often gradually transitioning from typical pyroxene gabbro with relics of primary magmatic structures (gabbro) to gabbro-amphibolites and to granoblast apogabral amphibolites. Amphibolized gabbro and gabbro-amphibolites are more common. The isochronous age of the complex formations is 3650 million years.

Novopavlivskiy granitoid complex (AR_{1np2}) – ultrametamorphic and paligenic granitoids of the Novopavlivskiy complex in the area comprise quite significant fields. They are characterized by a massive and gneiss-like texture. Due to the composition, they correspond to diorites and tonalites. The complex also includes obscure-striped plagiomigmatites of the same composition as derivatives of diorites and enderbites.

The rocks of the complex form a series of irregularly shaped massifs. The massifs sizes vary within 5 × 16 km to 1 × 2 km. Their outlines are often irregular in shape, amoebic. The internal structure of massifs is often complicated by the presence of xenoliths and schlers of gabbroids, pyroxenites, actinolites of the Novopavlivskiy mafic-ultramafic complex. The marginal parts of the massifs are composed of tonalites and plagiomigmatites of diorite composition. Central parts of the massifs are mainly composed of quartz diorites. Diorites are restricted and observed only near contacts with the gabbroid remains. The isochronous age of enderbites and tonalites is 3370–3470 million years.

The Neoeoarchean tectonic-magmatic stage at the site was marked by a wide display of basaltoid and rhyodacite volcanism, accompanied by intrusive magmatism and processes of intense anathexis and paligenesis, which led to the formation of numerous small intrusions and large massifs of autochthonous, para-autochthonous and intrusive granites of the Shevchenko ultra metamorphic plagiogranitoid complex.

The Shevchenkivskiy complex (AR_{3šv}) combines late-folded massive plagiogranites of ultrametamorphic origin, that form isolated individual massifs and numerous small dyke-like bodies of pegmatoid plagiogranites and albites in the surveyed area. The plagiogranites veins are reliably mapped only if they are injected with contrasting material complexes. Therefore, the largest number of them was found in the fields of metavolcanites development in the main composition of the Verkhnjotokmatska sequence. The albites vein are mapped quite easily. At the site, they form two bodies of small size, confined to tectonic faults areas. The nature of the contacts is subvertical. Due to their ultrametamorphic genesis, they are likely to be gradual.

Macroscopically plagiogranites are gneiss-like and massive rocks; cataclyssed varieties are shale-lenticular-striped and small-flecked. According to the mineral composition, biotite and, less frequently, amphibole-biotite are distinguished.

Dikes of pegmatoid plagiogranite composition have a coarse-grained, often porphyry structure and in most cases a gneiss-like texture. Porphyry inclusions are represented by quartz, less often by plagioclase.

Albitites are one of the original formations. Macroscopically, these are large-, medium- and fine-grained, sometimes porphyritic rocks of pink, light gray and milky white color with an uneven distribution of dark (biotite, actinolite, chlorite) minerals. Albite and oligoclase-albite make up to 70–95 % of the rock mass. Their radiogenic age is 3050 million years. Analysis of the relationship of albite with host rocks does not allow to unambiguously determine their genesis. Sharp, inconsistent contacts of the most bodies indicate an intrusive origin, and the gradual albite transitions into the rocks that contain them, with the formation of hybrid metasomatites of albite-chlorite-actinolite composition indicate metasomatic genesis. Most likely, they are the product of the plagiogranite magma residual melt, and its introduction was accompanied by sodium metasomatism of surrounding rocks.

The Proterozoic tectonic-magmatic cycle of the crystalline basement development on the territory of the surveyed area appeared in the Paleoproterozoic period. As a result of this activation, the Anadol'skiy complex was formed.

The Anadol'skiy complex (PR₁an), which is located on the surveyed area, combines most of the feldspar granites, aplite-pegmatoid granites and pegmatites of ultrametamorphogenic genesis, formed between 2600–2000 million years. Such a long interval of complex formation gives grounds to assert that several complexes are united in its composition, but it is impossible to dissect them without detailed isotope studies.

According to the conditions of occurrence and the nature of the relationship with the rocks that contain them, all granites of the complex are conventionally divided into two groups: granites that form isolated massifs or fields and vein granitoids (pegmatites, aplites, and aplite-pegmatoid granites). The first group forms massifs and bodies of various shapes (often amoeba-shaped) and sizes. In structural terms, a clear confinement of the granite development areas to the fault zones and nodes of their intersection are determined. In the gravitational field, granites correspond, in most cases, to negative values of gravity. In a magnetic field, granites correspond to zones and areas of demagnetization, often clearly inconsistent with the structural plan of the field. The gradual contacts of many bodies are represented by gneiss-like and obscure-striped texture, enrichment of endocontact zones with dark minerals and xenoliths, intensive microclination of the rocks containing them that are confirmed by the ultrametamorphic, autochthonous genesis of granites. Some granites are characterized by obvious signs of intrusive genesis: sharp inconsistent contacts, massive textures, porphyry-like structures. The close mineralogical and chemical composition of granites, geochemical specialization, joint occurrence give a reason to assume their kinship and palingeno-anatethic genesis, followed by separation and partial movement of the melt and its introduction in the form of intrusions.

According to the mineral, very unsustainable, composition of melanocratic (granodiorites), mesocratic and leukocratic (Alaskites) granites of the Anadol'skiy petrotype are divided into biotite and amphibole-biotite, rarely pyroxene-containing; according to the structural-textural composition – on massive medium- and coarse-grained, often porphyritic, fine-grained (aplite-like), gneiss-like. Their color is mostly pink with different tints.

Vein aplite-like, aplite-pegmatoid granites are widespread. The occurrence is mainly in agreement with the fall of the rocks that contain them, rarely – inconsistent. Most veins have a non-zonal structure. According to the mineral composition, microcline, microcline-oligoclase, rarely albite-

oligoclase-microcline are distinguished. Dark-colored minerals are represented by biotite, muscovite, tourmaline and pomegranate. Macroscopically, they are characterized by pink-gray, pink (almost red), rarely gray, light gray and greenish-gray (oligoclase-albite) color, variegated (from fine to giant) and pegmatoid structures and massive texture. The introduction of granites was accompanied by intensive microclination of the host rocks, up to the formation of feldspar migmatites.

Geological and technological characteristics of minerals. Deposits of the Neo-Petrine Neogene suite are productive for the extraction of clays and kaolins, in the base of which the undivided deposits of the Upper Eocene (Kyivska suite) and Oligocene (Kharkivska suite) lie. These are coastal-marine deposits like marls, calcareous clays, siltstones, weakly cemented sandstones and glauconite quartz sands. The total thickness of the Kyivska and Kharkivska suites varies from 0,0 to 60–70 m.

Novopetrivska suite is composed of quartz sands, among which kaolin and clay layers are located. In the upper part of the suite the sands are light gray to white, in some areas – yellowish-gray, iron, fine-grained, with a slight admixture of clay particles. Among them, thin lenses of fine- and coarse-grained strong sandstones are rarely found. In the lower part of the suite the sands are clayey gray and light gray from fine- to coarse-grained, with fine-grained and silty layers. Among these sands there are deposits of secondary kaolin and refractory clays (minerals) of various capacities. Kaolins and clays form a single deposit. Clays usually lie under kaolins, however, a three-layer deposit: refractory clays – kaolins – refractory clays, is rare. Refractory clays in sections I and II are very widespread, but in the eastern half of section II they are often absent or have a non-operating capacity, and in the north eastern corner of section II are completely wedged.

The thickness of the refractory clays layer in the section I varies from 0 to 8,4 m, in the section II – from 0 to 6,65 m. Among refractory clays, a layer of clayey sand and substandard sandy clays up to 1.7 m thick is rare.

Secondary kaolins lie above the clays, and are almost everywhere distributed in the section II, but sporadically in the section I – in the form of low-power lenses.

The thickness of the kaolin layer in section II varies from 0,2 to 4,65 m, and in section I it varies from 0,1 m to 2,2 m, reaching 3,5 m in the north.

The total thickness of the kaolin-clay deposit in the section II is 0,2–8,9 m, and in the section I – 0,5–8,85 m.

Kaolins and clays are covered with white, light gray and yellowish-gray fine- and fine-grained quartz sands, which also belong to the Novopetrivska suite in all parts. The supra-kaolin sands of the Novopetrivska suite at the Pologivskiy deposit have been explored as raw materials for the preparation of the mass used in the laying of mine workings in the mines of the Zaporizhzhia Iron Ore Plant. These sands are considered as associated minerals.

The mineral composition of Pologivskiy kaolins and clays was studied by the Kharkiv Polytechnic Institute and the Ukrainian Institute of Refractories (Shpylychak *et al.*, 1999). Studies have shown that clays and kaolins are characterized by almost the same mineral composition. Most of them are composed of fine-grained kaolinite, and quartz predominates from impurities. Accessory and ore minerals are represented by zircon, rutile, ilmenite and hematite. Refractory clays are characterized by a finer structure of the main mass and very small grain size (0,001 mm). Organics give kaolinite a brown colour under a microscope. In kaolins, kaolinite is seen as a colourless

aggregate of thin scales and individual scales. In large fractions of clays and kaolins kaolinite has the form of thin silvery-white plates. Quartz is present in clays and kaolins in the form of rolled, less often semi-rolled and unrolled grains. It usually makes up most of the large fractions of kaolin. In

refractory clays, quartz is represented by the finest grains (0,001 mm). Accessory and ore minerals also have a larger grain composition in kaolins and a thin grain composition in clays. The content of minerals and individual fractions are shown in table.

Table

Mineral composition of kaolin and clay							
	Name of minerals	Kaolin			Refractory clay		
		Content in % by fractions			Content in % by fractions		
		0,05	0,05-0,01	0,01	0,05	0,05-0,01	0,01
1.	Kaolinite	0-10	8-60	90-95	-	-	90-95
2.	Galluazite	-	0-3	0-6	-	-	-
3.	Hydromica	-	0-5	1-4	-	-	1-5
4.	Muscovite and sericitis	1-30	20-75	1-2	-	5-10	2-5
5.	Quartz	40-90	2-15	1-3	85-98	60-70	4-7
6.	Chalcedony	0-2	-	-	2-5	1-2	-
7.	Feldspar	2-20	1-3	-	1-4	1-4	-
8.	Tourmaline	-	0-2	-	-	-	-
9.	Zircon	-	0-2	-	-	2-5	-
10.	Titanitis	-	-	-	-	1-4	-
11.	Rutile	-	0-2	-	-	1-3	-
12.	Sillimanite	-	-	-	-	1-3	-
13.	Ilmenite	1-3	0-2	-	1-2	3-7	-
14.	Limonite	0-4	0-3	-	1-3	2-6	-
15.	Pyrite	-	-	-	-	-	-
16.	Carbonaceous matter	0-3	0-2	-	1-8	1-3	-

Chemical composition. In order to study the chemical composition of refractory clays and kaolins, shortened and complete chemical analyzes were performed.

Pologivskiy clays and kaolins are characterized by a high content of alumina. Its average content ranges from 29,394 to 35,17 in clays and from 28,69 to 37,51 in kaolins.

The lowest content of alumina is observed in sandy intervals.

The average content of one and a half iron oxides in kaolins is 0,96–1,39 %, in clays 1,15–1,62 %.

The SiO₂ content increases as the variety decreases and in low-grade varieties reaches 56,2 % in kaolins and 69,92 % in clays.

Titanium-containing minerals are mainly associated with sand material, so the content of titanium oxide in low-grade clays and kaolins is higher. At the same time, it is lower in kaolins, than in clays.

The content of calcium oxide and magnesium is almost the same. In kaolins, CaO and MgO range from 0,18 % to 0,24 % and from 0,15 % to 0,22 %, respectively. In refractory clays, the content of CaO is 0,23–0,29 %, and MgO is 0,17–0,23 %.

The content of K₂O and Na₂O increases with increasing variety of the mineral. K₂O – from 0,19 % in clay to 0,33 % in kaolin, and the value of Na₂O varies from 0,111 % in clay to 0,16 % in kaolin.

The SO₃ content is insignificant and is one hundredth of a percent.

The losses during calcination are directly dependent on the value of Al₂O₃ and range from 11,61 % to 13,35 % in kaolin and from 9,37 % to 12,86 % in clay.

Technological properties. Studies of the technological properties of refractory raw materials of the Pologivskiy deposit have their own history, and were conducted both in the laboratory and in the factory (*Verkhovodov et al., 1985*).

In 1952, the All-Union Research Institute of Refractories (ARIR) developed a technology for making ladle bricks from Pologivskiy kaolin by the method of semi-dry pressing. At the same time, experimental batches of ladle bricks were produced at the Zaporizhzhia Refractory Plant. Their tests in production conditions gave positive results.

In 1955, the Kharkiv Polytechnic Institute conducted laboratory and technological studies of kaolins and clays of the section II, as a result of which their suitability for obtaining class A refractories was established.

In 1960, the Ukrainian Institute of Refractories (UIR) took 3 samples of kaolin and 5 samples of clay from the existing on the section I quarry in order to establish their suitability for the production of aluminosilicate refractory products. Technological research was conducted in the direction of maximum use of raw materials of the Pologivskiy deposit, elimination of multicomponent charge and replacement of Chasov Yar clays with Pologivskiy deposits. On the basis of the carried-out laboratory-technological researches the conclusion on possibility of obtaining of high-quality aluminosilicate products from kaolins was made. Pologivskiy kaolin can be used to make chamotte without the clay addition, as well as a binder. The ratio of chamotte and binder is 80–20 %. The refractories obtained in the laboratory meet the requirements of high density for Class A blast furnace bricks and other products of appropriate determination. Pologivski clays are recognized as suitable for the production of 100 % refractories, as well as a binder component instead of Chasov-Yar clays. Products made entirely of semi-acid clay meet the requirements for semi-acid refractory products of class B.

In 1962, the Dnipropetrovsk Metallurgical Institute studied the possibility of using unenriched Pologivskiy kaolin to obtain normal electrocorundum and other products of electric smelting. For this purpose, an experimental smelting of PLK-0 kaolin was carried out at the Zaporizhzhia Abrasive Products Plant, as a result of which normal electrocorundum was obtained. In 1956, experiments were carried out at the Chelyabinsk Electrometallurgical Plant to obtain a high-alumina product from the agglomerate of Pologivskiy kaolin. They also confirmed the results obtained earlier.

Based on the carried out works, the State Metallurgical Committee instructed the Kharkiv Institute "Giprostal" to develop technical and economic considerations for the choice of technology and location for the production of intermediate products for synthetic slag using Pologivskiy

kaolins. However, the technological scheme of Kaolin processing of the Pologivskiy deposit for these purposes has not been developed.

In 1964, the Kyiv Experimental Research Plant conducted laboratory and semi-plant studies of the raw materials of the Pologivskiy deposit in order to establish its suitability for the production of sewer pipes, interior tiles and sanitary ware. Material of 3 samples of kaolin, 3 samples of clay and 2 samples of sand taken from the existing quarry was used to obtain experimental products. Tests have established the suitability of clays and kaolins in the production of interior tiles and sanitary ware.

In 1966, the Kharkiv Polytechnic Institute continued to study the technological properties of Pologivskiy kaolin as a raw material for the production of facing tiles. The tests gave a positive result – the quality of facing tiles was higher than that of tiles obtained from primary enriched kaolin.

Pologivskiy kaolins and clays have long been used in refractory, machine-building, ceramic, cement and other industries. The main volume of extracted raw materials is consumed by refractory plants that use it for the production of various products: normal and cupola bricks, siphon tubes, shaped products, etc.

Given the extensive experience in the use of Pologivskiy kaolins and clays in a number of industries, in the exploration in 1985 and the revaluation of reserves in 2010–2020, samples for additional study of the technological properties of minerals were not taken.

Conclusions. Kaolin deposits of the Pologivskiy deposit belong to the secondary (redeposited products of weathering crust) genetic type, which are characterized by significant, but in comparison with other kaolins (within Ukraine) low content of sand impurities on sieves №№ 0,02, 0,09, 0,063, mechanical strength of the mineral samples of the deposit in both dry and calcined state is almost three times higher than the enriched primary kaolins spread throughout the rest of the country.

Kaolin ores of the Pologivskiy deposit have high geological and technological indicators in comparison with other deposits of the world. Deposits of the Novopetrivska Neogene suite are productive for the extraction of clays and kaolins. These are mainly coastal-marine deposits like marls, calcareous clays, siltstones, weakly cemented sandstones and glauconite quartz sands. The total thickness of the Kyivska and Kharkivska formations varies from 0,0 to 60–70 m.

During the long period of exploration and operation of the Pologivskiy deposit the mineralogical and chemical composition, physical-mechanical, ceramic and technological properties of kaolins and clays, which have been successfully used for many years by refractory, metallurgical, chemical and other industries, have been studied with sufficient completeness.

References

- SHpyl'chak, V.A., Petrenko, A.A. (1999). Otchet o geologicheskoy doizuchenii ploshchadey masshtaba 1:200 000 territorii listov L-36-VI (Zaporozh'e), L-37-I (Pologi), provedennom v 1990–1999 gg. Eliseevskim GSO. [in Russian]
- Verhovodov, P.N., Uvarova, Z.N. (1985). Geologicheskij otchet o dorazvedke II uchastka Polozhskogo mestorozhdeniya kaolinov i ognepurnykh glin za 1979–1985 zody (Zaporozhskaya oblast'). [in Russian]
- Datsenko, L.M. et al. (2014). Fizychna heohrafiia Zaporizkoj oblasti. Melitopol: Vydavnytstvo MDPU im. B. Khmelnytskoho. [in Ukrainian]
- Datsenko L.M. et al. (2014). Pivnichno-Zakhidne Pryazovia: heolohiia, heomorfologii, heoloho-heomorfologichni protsesy, heoekologichniy stan. Melitopol: Vydavnytstvo MDPU im. B. Khmelnytskoho. [in Ukrainian]
- Abedini, A., Rezaei, Azizi M. (2019). The Hizeh-Jan Kaolin Deposit of NW Iran: the Tetrad Effect in REE Distribution Patterns. *Acta Geologica Sinica*, 93, 1, 74–87. DOI: 10.1111/1755-6724.13765
- Adagunodo, T.A., George, A.I., Ojoawo, I.A., Ojesanmi, K., Ravisankar, R. (2018). Radioactivity and radiological hazards from a kaolin mining field in Ifonyintedo, Nigeria. *MethodsX*, 5, 362–374. DOI: 10.1016/j.mex.2018.04.009
- Akinsunmade, A., Tomecka-Suchoń, S., Pysz, P. (2019). Assessment of kaolin resources using electrical resistivity method in part of Ekiti state south-west Nigeria. *5th International Scientific Conference on Civil Engineering-Infrastructure-Mining, CEIM 2019; Krakow, Poland; 17 January 2019. Web of Conferences*, V. 106, 24 June 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201910601009
- Awad, M.E., Amer, R., López-Galindo, A., El-Rahmany, M.M., García del Moral, L.F., Viseras, C. (2018). Hyperspectral remote sensing for mapping and detection of Egyptian kaolin quality. *Applied Clay Science*, 160, 249–262. DOI: 10.1016/j.clay.2018.02.042
- Bedassa, G., Getaneh, W., Hailu, B. (2019). Geochemical and mineralogical evidence for the supergene origin of kaolin deposits – Central Main Ethiopian Rift. *Journal of African Earth Sciences*, 149, 143–153. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.08.005
- Datsenko, L., Movchan, S., Maliuta, S., Chebanova, Y., Hanchuk, M. (2020). Volodarsk apatite deposit in the East Pryazovia region. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Geology, 18–24 August, 2020*, p. 373–386. DOI: 10.5593/sgem2020/1.1/s01.047
- Fang, Q., Hong, H., Furnes, H., Chorover, J., Luo, Q., Zhao, L., Algeo, T.J. (2019). Surficial weathering of kaolin regolith in a subtropical climate: Implications for supergene pedogenesis and bedrock argillization. *Geoderma*, 337, 225–237. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.09.020
- Grishin, I.A., Burmistrov, K.V., Sokolovsky, A.V. (2017). Improvement of quality of refractory clays at Kumak deposit. *Gornyi Zhurnal*, 12, 63–67. DOI: 10.17580/gzh.2017.12.12
- Hussin, A., Rahman, A.H.A., Ibrahim, K.Z. (2018). Mineralogy and geochemistry of clays from Malaysia and its industrial application. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 31 December 2018, V. 212, Is. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/212/1/012040
- Ivanov, M.A., Pak, V.I., Nalivayko, A.Y., Medvedev, A.S., Kirov, S.S., Bozhko, G.G. (2019). Prospects of using Russian highsilicon raw materials in alumina production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 330, 3, 93–102. DOI: 10.18799/24131830/2019/3/170
- Jige, M., Takagi, T., Takahashi, Y., Kurisu, M., Tsunazawa, Y., Morimoto, K., Hoshino, M., Tsukimura, K. (2018). Fe-kaolinite in granite saprolite beneath sedimentary kaolin deposits: A mode of Fe substitution for Al in kaolinite. *American Mineralogist*, 103, 7, 1126–1135. DOI: 10.2138/am-2018-6478
- Laraba, M. (2019). Characterization of Algerian kaolins for utilization as a raw material in electrical insulators. *Ceramica*, 65, 374, 267–273. DOI: 10.1590/0366-69132019653742556
- Nzeukou Nzeugang, A., Ouahabi, M.E., Aziwo, B., Mache, J.R., Mefire Mouton, H.S., Fagel, N. (2018). Characterization of kaolin from Mankon, northwest Cameroon. *Clay Minerals*, 53, 4, 563–577. DOI: 10.1180/clm.2018.45
- Oyebanjo, O., Ekosse, G.-I., Odiyo, J. (2018). Geochemical characterization of the <2 µm fractions of cretaceous-tertiary kaolins from eastern dahomey and Niger delta basins, Nigeria: Implications on paleoenvironment, provenance, and tectonic settings. *Journal of African Earth Sciences*, 147, 402–410. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.07.010
- Oyebanjo, O.M., Ekosse, G.E., Odiyo, J.O. (2018). Mineral Constituents and Kaolinite Crystallinity of the <2 µm Fraction of Cretaceous-Paleogene/Neogene Kaolins from Eastern Dahomey and Niger Delta Basins, Nigeria. *Open Geosciences*, 10, 1, 157–166. DOI: 10.1515/geo-2018-0012
- Raphalalani, A., Ekosse, G.-I., Odiyo, J., Ogola, J., Bukalo, N. (2019). Trace element and stable isotope geochemistry of Lwamondo and Zebediela Kaolins, Limpopo Province, South Africa: Implication for paleoenvironmental reconstruction. *Minerals*, 9, 2. DOI: 10.3390/min9020093
- Saber, E.-S., Ali, M., El-Sheikh, A. (2018). Provenance studies of Kalabsha kaolin deposits, Egypt: a petrographical and geochemical approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 13. DOI: 10.1007/s12517-018-3690-4
- Yanik, G., Ceylantekin, R., Taşçıl, E. (2018). The Gümüşköy (Kütahya, Turkey) kaolin deposit and its ceramic properties. *Clay Minerals*, 53, 3, 515–524. DOI: 10.1180/clm.2018.38
- Zirjanizadeh, S., Rocha, F., Samiee, S. (2018). Mineralogical, geochemical and stable isotope studies of kaolin deposits in north-west Gonabad district (Eastern Iran). *Geological Quarterly*, 62, 2, 385–399. DOI: 10.7306/gq.1414

Список використаних джерел

- Верховодов, П.Н., Уварова, З.Н. (1985). Геологический отчет о доразведке II участка Положского месторождения каолинов и огнеупорных глин за 1979–1985 годы (Запорожская область).
- Даценко, Л.М. та ін. (2014). Фізична географія Запорізької області. Мелітополь: Вид-во МДПУ ім. Б. Хмельницького.
- Даценко, Л.М. та ін. (2014). Північно-Західне Приазов'я: геологія, геоморфологія, геолого-геоморфологічні процеси, геоекологічний стан. Мелітополь: Видавництво МДПУ ім. Б. Хмельницького.
- Шпыльчак, В.А., Петренко, А.А. (1999). Отчет о геологическом доизучении площадей масштаба 1:200 000 территории листов L-36-VI (Запорожье), L-37-I (Пологи), проведенном в 1990–1999 гг. Елисеевским ГСО.
- Abedini, A., Rezaei, Azizi M. (2019). The Hizeh-Jan Kaolin Deposit of NW Iran: the Tetrad Effect in REE Distribution Patterns. *Acta Geologica Sinica*, 93, 1, 74–87. DOI: 10.1111/1755-6724.13765
- Adagunodo, T.A., George, A.I., Ojoawo, I.A., Ojesanmi, K., Ravisankar, R. (2018). Radioactivity and radiological hazards from a kaolin mining field in Ifonyintedo, Nigeria. *MethodsX*, 5, 362–374. DOI: 10.1016/j.mex.2018.04.009
- Akinsunmade, A., Tomecka-Suchoń, S., Pysz, P. (2019). Assessment of kaolin resources using electrical resistivity method in part of Ekiti state

southwest Nigeria. *5th International Scientific Conference on Civil Engineering-Infrastructure-Mining, CEIM 2019; Krakow, Poland; 17 January 2019. Web of Conferences*, V. 106, 24 June 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201910601009

Awad, M.E., Amer, R., López-Galindo, A., El-Rahmany, M.M., García del Moral, L.F., Viseras, C. (2018). Hyperspectral remote sensing for mapping and detection of Egyptian kaolin quality. *Applied Clay Science*, 160, 249–262. DOI: 10.1016/j.clay.2018.02.042

Bedassa, G., Getaneh, W., Hailu, B. (2019). Geochemical and mineralogical evidence for the supergene origin of kaolin deposits – Central Main Ethiopian Rift. *Journal of African Earth Sciences*, 149, 143–153. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.08.005

Datsenko, L., Movchan, S., Maliuta, S., Chebanova, Y., Hanchuk, M. (2020). Volodarsk apatite deposit in the East Pryazovia region. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Geology, 18–24 August, 2020*, p. 373–386. DOI: 10.5593/sgem2020/1.1/s01.047

Fang, Q., Hong, H., Furnes, H., Chorover, J., Luo, Q., Zhao, L., Algeo, T.J. (2019). Surficial weathering of kaolin regolith in a subtropical climate: Implications for supergene pedogenesis and bedrock argillization. *Geoderma*, 337, 225–237. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.09.020

Grishin, I.A., Burmistrov, K.V., Sokolovsky, A.V. (2017). Improvement of quality of refractory clays at Kumak deposit. *Gornyi Zhurnal*, 12, 63–67. DOI: 10.17580/gzh.2017.12.12

Hussin, A., Rahman, A.H.A., Ibrahim, K.Z. (2018). Mineralogy and geochemistry of clays from Malaysia and its industrial application. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 31 December 2018, V. 212, Is. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/212/1/012040

Ivanov, M.A., Pak, V.I., Nalivayko, A.Y., Medvedev, A.S., Kirov, S.S., Bozhko, G.G. (2019). Prospects of using Russian high8silicon raw materials in alumina production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 330, 3, 93–102. DOI: 10.18799/24131830/2019/3/170

Jige, M., Takagi, T., Takahashi, Y., Kurisu, M., Tsunazawa, Y., Morimoto, K., Hoshino, M., Tsukimura, K. (2018). Fe-kaolinite in granite saprolite beneath

sedimentary kaolin deposits: A mode of Fe substitution for Al in kaolinite. *American Mineralogist*, 103, 7, 1126–1135. DOI: 10.2138/am-2018-6478

Laraba, M. (2019). Characterization of Algerian kaolins for utilization as a raw material in electrical insulators. *Ceramica*, 65, 374, 267–273. DOI: 10.1590/0366-69132019653742556

Nzeukou Nzeugang, A., Ouahabi, M.E., Aziwo, B., Mache, J.R., Mefire Mouton, H.S., Fagel, N. (2018). Characterization of kaolin from Mankon, north-west Cameroon. *Clay Minerals*, 53, 4, 563–577. DOI: 10.1180/clm.2018.45

Oyeбанjo, O., Ekosse, G.-I., Odiyo, J. (2018). Geochemical characterisation of the <2 µm fractions of cretaceous-tertiary kaolins from eastern dahomey and Niger delta basins, Nigeria: Implications on paleoenvironment, provenance, and tectonic settings. *Journal of African Earth Sciences*. 147, 402–410. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.07.010

Oyeбанjo, O.M., Ekosse, G.E., Odiyo, J.O. (2018). Mineral Constituents and Kaolinite Crystallinity of the <2 µm Fraction of Cretaceous-Paleogene/Neogene Kaolins from Eastern Dahomey and Niger Delta Basins, Nigeria. *Open Geosciences*, 10, 1, 157–166. DOI: 10.1515/geo-2018-0012

Raphalalani, A., Ekosse, G.-I., Odiyo, J., Ogola, J., Bukalo, N. (2019). Trace element and stable isotope geochemistry of Lwamondo and Zebediela Kaolins, Limpopo Province, South Africa: Implication for paleoenvironmental reconstruction. *Minerals*, 9, 2. DOI: 10.3390/min9020093

Saber, E.-S., Ali, M., El-Sheikh, A. (2018). Provenance studies of Kalabsha kaolin deposits, Egypt: a petrographical and geochemical approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 13. DOI: 10.1007/s12517-018-3690-4

Yanık, G., Ceylantekin, R., Taşçıl, E. (2018). The Gümüşköy (Kütahya, Turkey) kaolin deposit and its ceramic properties. *Clay Minerals*, 53, 3, 515–524. DOI: 10.1180/clm.2018.38

Zirjanizadeh, S., Rocha, F., Samiee, S. (2018). Mineralogical, geochemical and stable isotope studies of kaolin deposits in north-west Gonabad district (Eastern Iran). *Geological Quarterly*, 62, 2, 385–399. DOI: 10.7306/gq.1414

Надійшла до редколегії 02.11.21

Л. Даченко, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: liudmyla.datsenko@tsatu.edu.ua;

М. Ганчук, канд. с.-г. наук,
E-mail: ganchukmn@gmail.com;

Ю. Чебанова, канд. геогр. наук,
E-mail: yuliia.chebanova@tsatu.edu.ua;

С. Малюта, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: serhii.maliuta@tsatu.edu.ua;

О. Мазикіна, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: gavrich17@gmail.com,

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного,
просп. Б. Хмельницького, 18, Мелітополь, 72312, Україна

ПОЛОГІВСЬКЕ РОДОВИЩЕ КАОЛІНУ: ГЕОЛОГІЯ, МІНЕРАЛЬНИЙ ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД, ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Район Пологівського родовища каоолінів і вогнетривких глин розташований на межі двох геологічних регіонів: Приазовського кристалічного масиву й Конкської-Ялинської западини. У геологічній будові району беруть участь докембрійські кристалічні породи й осадові відклади крейдової, палеогенової, неогенової та четвертинної систем. Геологічна будова району наведена за результатами розвідки родовища та геологознімальних робіт. Відклади четвертинної системи розповсюджені на території повсюдно і плащеподібно залягають на підстилаючих породах. Нижня межа четвертинної системи проводиться в підшві березанського кліматоліту відповідно до Легенди геологічної карти України масштабом 1:200 000 Центральноукраїнської серії 1996 р. Підстилаючими породами на більшій частині території є червонобурі глини пліоцену, на решті – породи кристалічного фундаменту, крейдової, палеогенової і неогенової систем.

Потужність четвертинних відкладів становить 10–20 м. Продуктивними для видобутку глини та каоолінів є відкладення ново-петрівської світи неогену, у підшві яких залягають нерозчленовані відкладення верхнього еоцену (київська світа) і олігоцену (харківська світа). Це прибережно-морські відклади – мергелі, вапняковисті глини, алевроліти, слабощементовані пісковики та глауконіткварцові піски. Сумарна потужність київської і харківської світ змінюється від 0,0 до 60–70 м. Глини й каооліни характеризуються практично однаковим мінеральним складом. Основна їхня маса представлена тонколкукуватим каоолінітом, а з домішок переважає кварц. Акцесорні й рудні мінерали представлені цирконом, рутилом, ільменітом і гематитом. Кварц присутній у глинах і каоолінах у вигляді обкатаних, рідше напівобкатаних і необкатаних зерен. З каоолінів родовища виробляють високоякісні алюмосилікатні вироби. Пологівський каоолін можна використовувати для виготовлення шамоту без додавання глини, а також як сполучну домішку. Співвідношення шамоту та зв'язуючої речовини становить 80–20 %. Отримані в лабораторних умовах вогнетриви задовольняють вимоги підвищеної щільності до доменної цегли класу А та інших виробів відповідального призначення. Пологівські глини визнані придатними для виготовлення 100 % вогнетривів, а також як сполучні компоненти замість часов'ярських глин. Вироби, виготовлені цілком із напівкислої глини, відповідають вимогам до напівкислих вогнетривких виробів класу Б. Пологівські каооліни та глини тривалий час використовують у вогнетривкій, машинобудівній, керамічній, цементній та інших галузях промисловості.

Ключові слова: каоолін, Пологівське родовище, геологія, стратиграфія, мінеральний та хімічний склад каооліну і глини, технологічні властивості.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 550.4:556.3(477.42)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.11>Т. Кошлякова, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: tatianakoshliakova@gmail.com;

І. Кураєва, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: KI4412674@gmail.com;Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 34, Київ, 03142, Україна;

О. Кошляков, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: kosh_57@ukr.net;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна;

Л. Олексенко, д-р хім. наук, проф.,

E-mail: olexludmil@ukr.net;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Хімічний факультет, вул. Льва Толстого, 12, м. Київ, 01033, Україна;

І. Швайка, канд. геол. наук, наук. співроб.,

E-mail: ishvaika@gmail.com;

Л. Проскурка, мол. наук. співроб.,

E-mail: igmrproskurko@gmail.com;Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 34, Київ, 03142, Україна**МІКРОЕЛЕМЕНТНИЙ СКЛАД ПИТНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД
НА ТЕРИТОРІЇ КОРОСТИШІВСЬКОГО РАЙОНУ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ
У СИСТЕМІ ГІДРОГЕОХІМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О. Л. Шевченком)*

Досліджено мікроелементний склад питних підземних вод на території Коростишівського району Житомирської області з погляду потенційної загрози здоров'ю людей. Дослідження проведено в рамках комплексу загальних моніторингових досліджень якості підземних вод регіону в липні 2020 – серпні 2021 років. Мікроелементний аналіз проб води виконано за допомогою сучасного високочутливого методу мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-MS). Отримані результати можуть бути корисними для обґрунтування необхідності коригування харчування місцевих жителів шляхом додаткового вживання вітамінно-мінеральних комплексів.

Ключові слова: питні підземні води, мікроелементний склад, гідрогеохімія, моніторинг, есенціальні елементи, техногенний вплив.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день постійно зростаючий рівень антропогенного забруднення об'єктів навколишнього середовища (ґрунтів, природних вод та атмосферного повітря) обумовлює необхідність проведення постійного моніторингу їхнього стану. Особливо важливим є встановлення елементного складу питної води та вивчення особливостей його формування на територіях окремих країн у зв'язку зі світовою проблемою забезпечення людства якісною та безпечною питною водою, яка є основою життєдіяльності людини. Актуальним є розв'язання цих задач і для різних гідрогеологічних регіонів України, які відрізняються низкою геохімічних особливостей.

Природні води містять невелику кількість розчинених газів, мінеральних і органічних речовин натурального походження. У воді високої якості загальні концентрації розчинених речовин можуть сягати значних величин (сумарно до 1000 мг/дм³). Але вода може містити і небажані компоненти, дані про їхню кількість є необхідними, зокрема, для створення норм щодо якості питної води (Синицина і др., 2020). У більшості країн світу діють внутрішні нормативні документи, що регламентують якість питної води. Також розроблені міжнародні норми (такі як нормативи ВООЗ, Водна Рамкова Директива ЄС тощо), що служать гарантією безпеки питної води і регламентують гранично допустимі концентрації елементів та мікроорганізмів у ній. Разом із тим, згідно з даними ВООЗ, досить поширеним є не лише використання розвинених систем централізованого постачання очищеної питної води згідно зі встановленими нормами, а й використання для споживання мінералізованої

води з підземних джерел, свердловин та колодязів без її попереднього очищення та встановлення елементного складу (Крайнев і др., 2004).

Необхідність наявності певної кількості мінеральних речовин у питній воді є важливою для збалансованого вмісту їх в організмі людини, що безпосередньо визначає її здоров'я (Лютай, 1992; Кондратюк, 1989). Для функціонування організму людини необхідні кілька груп елементів – структурні елементи, які всі є есенціальними, тобто життєво необхідними; мікроелементи та ультрамікроелементи. До структурних елементів відносять основні елементи і макроелементи, до групи мікроелементів – есенціальні, умовно есенціальні, умовно токсичні елементи та ртуть, а групу ультрамікроелементів поділяють на рідкісноземельні, елементи платинової групи та радіоактивні елементи.

За ступенем корисності для організму людини елементи можна розбити на такі групи:

- есенціальні (життєво важливі елементи, включно зі структурними, що на 99 % формують елементний склад організму): H, O, N, C, Ca, Cl, F, K, Mg, Na, P, S;
- мікроелементи: Cr, Cu, Fe, I, Mn, Mo, Se, Zn;
- умовно есенціальні (життєво важливі, але шкідливі в певних дозах): Ag, Al, Au, B, Br, Co, Ge, Li, Ni, Si, V;
- умовно токсичні мікроелементи й ультрамікроелементи: As, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Hg, Ho, In, Ir, La, Lu, Nb, Nd, Os, Pb, Pd, Pr, Pt, Rb, Re, Rh, Ru, Sb, Sc, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, W, Y, Yb, Zr.

Що стосується ртуті (Hg), то вона є шкідливою для людини в будь-якій кількості, тому її безумовно можна назвати токсичним елементом.

Дефіцит або надлишок тих чи інших елементів у питній воді може обумовлювати виникнення низки захворювань у населення, що її споживає (Скальний *и др.*, 2004). Дані про можливі патологічні стани організму людини, що обумовлені не лише надлишком, а й дефіцитом есенціальних елементів, що нормовані в питній воді за санітарно-токсикологічним показником шкідливості (Синицина *и др.*, 2020), свідчать про важливість їх урахування при прогнозуванні ризиків для здоров'я людини.

Слід зазначити, що причиною того, що в більшості людей деякі життєво важливі мікроелементи перебувають у дефіциті, а токсичні мікроелементи – в надлишку, є низька якість питної води і продуктів харчування, а також незадовільний екологічний стан навколишнього середовища. Зокрема, населення крупних міст потерпає від надлишку важких металів, які надходять до організму людини з водою. Систематичне вживання неякісної або неконтрольованої за складом питної води може призвести до появи у населення хронічних захворювань, що може вплинути і на здоров'я майбутніх поколінь. У зв'язку із цим встановлення мікроелементного складу питних підземних вод природного походження у різних гідрогеологічних регіонах України є вкрай необхідним як для її безпечного використання населенням, так і для районування території України за мікроелементним складом питної води природного походження.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Вивченню проблеми забруднення питних підземних вод, а також впливу надлишку чи нестачі мікроелементів на здоров'я населення, що їх споживає, присвячено низку вітчизняних та закордонних публікацій (Авицын *и др.*, 1991; Рудько, 2012; Golekar *et al.*, 2013; Мезенцева *та ін.*, 2018; Hussain *et al.*, 2019; Синицина *и др.*, 2020). Однак у літературі мало уваги приділяється зіставленню підземних вод за їхнім мікроелементним складом для різних гідрогеологічних регіонів України у зв'язку зі структурно-геологічними, а також геохімічними особливостями досліджуваних територій. Слід зауважити, що кількість публікацій, які містять практичні дані щодо багаторічної динаміки показників хімічного складу підземних вод, є незначною.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. У контексті досягнення нетоксичного середовища в рамках Європейського зеленого курсу (European Green Deal), до якого Україна долучилася у 2020 році, актуальності набувають дослідження, спрямовані на вивчення мінерального складу та вмісту фізіологічно значущих хімічних елементів у питних підземних водах різних гідрогеологічних регіонів України, особливо тих, що характеризуються високим рівнем техногенного навантаження на підземну гідросферу та/або негативними тенденціями за показниками захворюваності населення. У статті розглядаються зміни в часі мікроелементного складу питних підземних вод у Коростишівському районі Житомирської області, що, згідно із сучасним гідрогеологічним районуванням України (Шестопалов *та ін.*, 2019), належить до водоносної системи Українського щита. Вибір території досліджень обумовлений тим, що згідно з тенденціями динаміки різних видів захворювань населення Житомирської області, поряд із Кіровоградською, Миколаївською, Харківською та Херсонською областями, належить до регіонів із переважанням негативних рис динаміки показників

захворюваності (Мезенцева *та ін.*, 2018). Для цих областей характерне зростання кількості випадків злоскісних новоутворень, серцево-судинних захворювань та хвороб органів дихання.

Мета досліджень – вивчення змін у часі хімічного, зокрема мікроелементного, складу підземних вод, що використовуються для питного постачання населенню Коростишівського району Житомирської області.

У статті наведено результати власних польових досліджень, а також використано звітні матеріали щодо експлуатаційних запасів Коростишівського родовища питних підземних вод.

Характеристика території дослідження. Досліджувана територія розташована в північно-західній частині Гідрогеологічної області тріщинних вод Українського щита (згідно із сучасним районуванням – до водоносної системи Українського щита) (Шестопалов *та ін.*, 2019) і характеризується наявністю комплексу переважно піщаних осадових порід незначної потужності (до 20 м), багатоповхоним заляганням водоносних горизонтів в умовах вільного водообміну. Зразки води зі свердловин та колодязів відбиралися в межах Коростишівського району Житомирської області, до якого приурочене Коростишівське родовище питних підземних вод. Загалом господарсько-питне і виробничо-технічне водопостачання у самому м. Коростишів здійснюється за рахунок експлуатації водоносних горизонтів у відкладах бучацького регіонарусу еоцену (P_{2bč}) і у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання (PR₁). Останній водоносний горизонт має найкращі показники якості води у досліджуваному регіоні, його гідрогеологічні характеристики добре вивчені й детально описані у звіті (Гребенюк *та ін.*, 2020). Водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання (PR₁) є регіонально витриманим по площі. Тріщинні води не приурочені до якого-небудь стратиграфічного комплексу, а незалежно від складу і віку водовмісних порід утворюють єдину гідравлічно зв'язану систему. Кристалічні породи залягають на глибині 5,0–25,8 м і представлені гнейсами, кристалосланцями і гранітами. У покрівлі кристалічних порід залягає їхня кора вивітрювання потужністю від 5–10 до 20 м, яка представлена каоліном і жорствою, зі збереженою структурою материнської породи. У місцях, де кора вивітрювання розмита, в покрівлі водоносного горизонту в тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання залягають водоносні горизонти в алювіальних відкладах голоцену і середнього неоплейстоцену, утворюючи шарувату гідравлічну систему. Формування хімічного складу підземних вод водоносного горизонту в тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання визначається насамперед фізико-географічними чинниками, які, у свою чергу, проявляються у вигляді різних геохімічних процесів, провідна роль серед яких належить вилуговуванню порід. Води вилуговування утворюються в зоні вільного водообміну. Малопотужна кора вивітрювання кристалічних порід складена жорствяно-глинистою породою з монтморилонітом, гідроксидами заліза та нонтронітом. З останнім пов'язано збагачення води сполуками нікелю. Формування ізотопів радіоактивних елементів у воді може відбуватися в зоні зачеплених вивітрюванням кристалічних порід.

Мешканці довколишніх сіл здебільшого споживають воду із присадибних криниць або свердловин, що експлуатують водоносний горизонт в алювіальних

відкладах першої – другої надзаплавних терас верхнього неоплейстоцену ($a^{1-2}P_{III}$), та приватних свердловин, пробурених на водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання (PR_1). Варто зазначити, що водозабірня ділянка Коростишівського МКП "Водоканал" розташована в зоні розвантаження підземних вод, де р. Тетерів відіграє роль потужної природної дрени. Крім того, у межах розповсюдження водоносного горизонту в алювіальних відкладах голоцену поверхневі води є джерелом формування експлуатаційних запасів підземних вод основного водоносного горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання (Koshliakova et al., 2020).

Методика дослідження. Мікроелементний аналіз зразків води було здійснено за допомогою методу мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-MS) на мас-спектрометрі з подвійним фокусуванням іонного променя "ELEMENT-2" фірми "Thermo Scientific" (корпорація Thermo Electron GmbH (Бремен)), що функціонує на базі Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України. Похибка вимірювання становила $\delta \leq 3\%$. Для отримання калібровок "сигнал-концентрація" застосовувався сертифікований стандарт (ICP multi-element standard solution VI, виробник – Merck KGaA), з якого виготовлялася серія 6 градувальних стандартів від 1 до 1000 ppb. Підготовка проб і

стандартів здійснювалася ваговим методом. Для приготування розчинів (промивні, холості, градувальні й аналізовані) використовували воду, очищену за допомогою апарата Millipore-Q3 (Millipore SA, Франція). Для характеристики загального хімічного складу підземних вод досліджуваного регіону використані результати гідрогеохімічного моніторингу, проведеного лабораторією Коростишівського міжрайонного відділу ДУ "Житомирський обласний лабораторний центр МОЗ України" та Центральною лабораторією ДП "Українська геологічна компанія" протягом 2017–2019 років.

Результати досліджень. У комплексі моніторингових досліджень якості підземних вод регіону з метою більш детального вивчення мікроелементного складу із залученням сучасних, більш чутливих, лабораторних методів у липні 2020 та у серпні 2021 року авторами було проведено відбір проб зразків води зі свердловин та криниць Коростишівського району Житомирської області, які використовуються місцевим населенням для питного водопостачання. Кожного року відбирали по 15 зразків води з криниць та по 10 зразків зі свердловин, розташованих на присадибних ділянках приватних будинків. Глибина криниць коливалася в межах 10–15 м, свердловин – 10–20 м. Результати мікроелементного аналізу зразків води представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Узагальнені результати мікроелементного аналізу зразків підземних вод (середні арифметичні) із зазначенням величин біологічно значущих концентрацій (БЗК)

Елемент, мг/дм³	Вид водозабірної споруди				БЗК (Барвиш и др. 2000), мг/дм³
	Криниця (водоносний горизонт в алювіальних відкладах 1–2 надзаплавних терас верхнього неоплейстоцену)		Свердловина (водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їх кори вивітрювання)		
	Середнє значення, мг/дм³				
	2020 рік	2021 рік	2020 рік	2021 рік	
Li	0,000922	0,004662	0,001555	0,004949	0,025
V	0,001036	0,001099	0,000122	0,000209	0,025
Cr	0,003326	0,004038	0,001729	0,002891	0,00175
Mn	0,000824	0,004389	0,000633	0,002043	0,05
Co	0,000008	0,000131	0,000017	0,00014	0,0075
Ni	0,000211	0,015931	0,000864	0,017301	0,0075
Cu	0,000197	0,001318	0,012659	0,018194	0,025
Zn	0,009309	0,091527	0,023665	0,074792	0,3
Sr	0,312244	0,386823	0,178328	0,21342	0,05
Cd	0,000023	0,000101	0,000081	0,000055	0,0025
Ba	0,063614	0,080914	0,065276	0,085503	0,02
Pb	0,000085	0,000906	0,000249	0,001582	0,01

Примітка. Кількість проб (N) = 25.

За методикою М.В. Барвиша та О.А. Шварца (Барвиш і др., 2000) було визначено величини біологічно значущих концентрацій (БЗК) основних фізіологічно значущих елементів для досліджуваних питних підземних вод.

За свідченням К.С. Злобіної (Злобіна, 2013), традиційно основним критерієм вибору елементів, що підлягають ретельному вивченню, є гранично допустима концентрація (ГДК). Однак, по-перше, не для всіх елементів установлені гранично допустимі концентрації. А по-друге, існують також елементи, для яких на поточний момент практично відсутня інформація про їхню роль у мікроелементному балансі людини і вміст у прісних підземних водах. Це передусім більшість рідкісних елементів. Для оцінювання оптимального вмісту елементів у складі досліджуваної води, що необхідно при її характеризуванні, доречним є застосування критерію БЗК. Це концентрація, за якої надходження елемента в організм

з водою позначається на загальному мікроелементному балансі людини. Автори терміна пропонують усі мікроелементи, які містяться у прісній підземній воді, поділити на дві групи. Перша – елементи, які перевищують БЗК, друга – елементи, що містяться в концентраціях, які не можуть суттєво вплинути на мікроелементний баланс людини. Нижня межа біологічно значущої концентрації – це величина, за якої надходження елемента в організм з питною водою становить 5 % від загального середньостатистичного надходження. При цьому вважається, що щодоби споживається 2 л питної води. Такий підхід дозволяє виокремити мікроелементи для першочергових еколого-гідрогеохімічних досліджень (Злобіна, 2013).

Порівняння БЗК зі вмістом мікроелементів та окремих мікроелементів, визначених при виконанні дослідження, надало змогу виявити, що в досліджуваних питних водах спостерігається надлишок таких

елементів, як Sr та Ba. У достатній кількості присутній Sr. Натомість було виявлено недостатню кількість таких елементів, як Li, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd та Pb. Варто зазначити, що у 2021 році (порівняно з 2020 роком) концентрація Ni та Zn в обстежених водозабірних спорудах значно зросла: концентрація Ni – у 75 разів у колодязях та у 20 разів у свердловинах, концентрація Zn – у 9 разів у колодязях та у 3 рази у свердловинах. Імовірно, це явище пов'язане з тим, що ці елементи мають техногенне походження, тому їхня концентрація у досліджуваних підземних водах стрімко зростає. Загалом, порівнюючи результати мікроелементного аналізу, виконаного у 2020 та 2021 роках, можна говорити про наявність тенденції до збільшення концентрацій досліджуваних мікроелементів у підземних водах, однак ця гіпотеза потребує уточнення за рахунок подальших моніторингових спостережень.

Що стосується макроелементного складу, то за даними звіту (*Гребенюк та ін., 2020*) підземні води горизонту, приуроченого до тріщинуватої зони кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання, є прісними, мають гідрокарбонатний, хлоридно-гідрокарбонатний тип. За катіонним складом води кальцієві та магнієво-кальцієві. Мінералізація змінюється від 0,3 до 0,6 г/дм³. Загальна твердість перебуває в межах 2,1–10,8 ммоль/дм³.

Значення pH становить 6,8–7,5. Загальний вміст заліза коливається від 0,2 до 7,0 мг/дм³, що є характерним для тріщинно-жильних вод кристалічного щита. На ділянках, не захищених від поверхневого забруднення, спостерігається підвищений вміст нітратів (від 76 до 379,40 мг/дм³), хлору (354–404 мг/дм³), сухого залишку (до 1,5 г/дм³). Хімічний склад води можна виразити узагальненою формулою:

$$M_{0,34-0,72} \frac{HCO_3 39-70 SO_4 8-39 Cl 18-30}{Ca 60-64 Mg 20-24 (Na+K) 9-15} pH 6,6-7,6.$$

У воді зазначається слабкий жовтуватий відтінок, що може бути обумовлено наявністю солей заліза. Мікробіологічні показники характеризуються відсутністю бактеріального забруднення: загальна кількість мікробів не перевищує 11 КУО/см³, бактерії групи кишкової палички відсутні. Феноли, пестициди, СПАР і нафтопродукти у воді практично відсутні.

Результати загального хімічного аналізу, виконаного для відібраних у 2020–2021 рр. зразків води, порівняно із гранично допустимими концентраціями (ГДК) згідно з Державними санітарними нормами та правилами "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10), представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Результати загального хімічного аналізу зразків підземних вод					
Показник хімічного складу	Вид водозабірної споруди				ГДК за ДСанПІН 2.2.4-171-10
	Криниця (водоносний горизонт в алювіальних відкладах 1-2 надзаплавних терас верхнього неоплейстоцену)		Свердловина (водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їх кори вивітрювання)		
	Середнє значення				
	2020 рік	2021 рік	2020 рік	2021 рік	
pH	6,95	6,68	7,22	7,05	6,5-8,5
Лужність	1,6	2,1	4,9	5,1	не нормується
Твердість, мг-екв/дм³	3,8	4,5	6,9	6,8	10
Кальцій, мг/дм³	56,11	56,1	96,2	94,2	не нормується
Магній, мг/дм³	12,16	20,7	25,54	25,5	не нормується
НСО₃⁻, мг/дм³	97,6	128,1	289,9	311,1	не нормується
Сульфати, мг/дм³	28,8	96,0	24	72,0	500
Залізо загальне, мг/дм³	0,03	0,04	0,05	0,07	1
Нітрати, мг/дм³	52,77	30,5	39,1	27,5	50
Хлориди, мг/дм³	42,6	48,3	39,1	49,7	350
Сухий залишок, г/дм³	0,224	0,313	0,304	0,378	1,5
Na+K сумарно, мг-екв/дм³	18,4	37,17	9,2	37,7	не нормується

Примітка. Кількість проб (N) = 25

Загалом досліджені зразки підземних вод за макроелементним складом відповідають нормативам ДСанПіН 2.2.4-171-10 для питної води з колодязів, каптажів та джерел. Виключенням є вміст нітратів, концентрація яких у колодязях станом на 2020 рік перевищувала ГДК.

Авторами було проаналізовано зміни у часі таких показників хімічного складу досліджуваних підземних вод: загальна мінералізація, вміст іонів Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻ та Cl⁻. Період спостережень за коливаннями концентрацій вказаних показників охоплював березень 2017 – грудень 2019 рр. (*Гребенюк та ін., 2020*). Відомо, що інтенсивність водовідбору, яка визначає гідродинамічні умови взаємодії поверхневих та підземних вод, є одним з головних чинників зміни їх хімічного складу. Було виявлено значущу

кореляцію між концентраціями Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻ та їх нормованими показниками за величиною водовідбору. Коефіцієнти кореляції Пірсона R становили, відповідно: для Mg²⁺ R=0,82; для SO₄²⁻ R=0,63; для Cl⁻ R=0,76. З метою встановлення закономірностей зміни досліджуваних показників хімічного складу підземних вод у зв'язку з водовідбором було побудовано графіки коливань нормованих показників за період 2017–2019 рр. (рис. 1–3).

Отримані результати показали, що у водоносному горизонті тріщинуватої зони кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання при збільшенні водовідбору підвищується вміст мінеральних речовин, що свідчить про істотну роль антропогенного чинника при формуванні хімічного складу досліджуваних підземних вод.

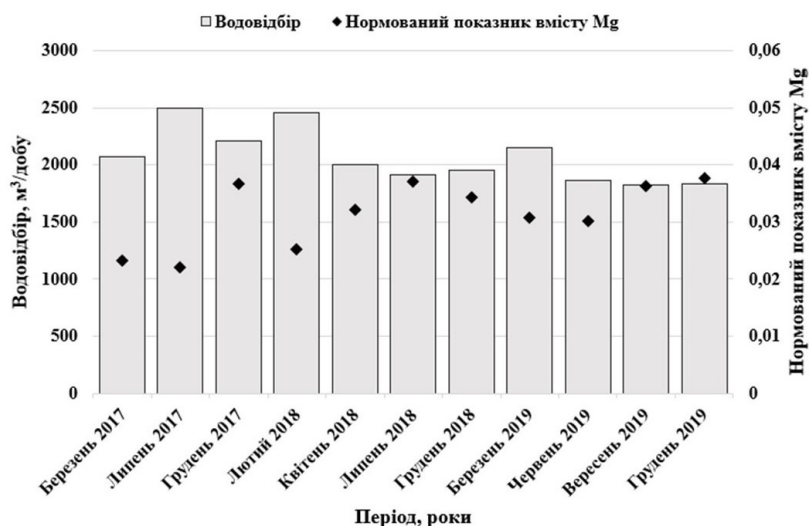


Рис. 1. Нормовані показники вмісту Mg та водовідбору з водоносного горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання в період 2017–2019 рр.

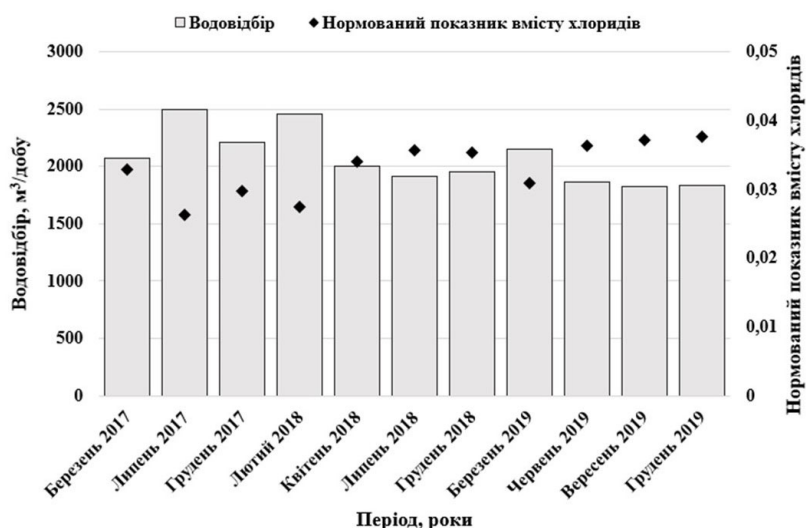


Рис. 2. Нормовані показники вмісту хлоридів та водовідбору з водоносного горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання в період 2017–2019 рр.

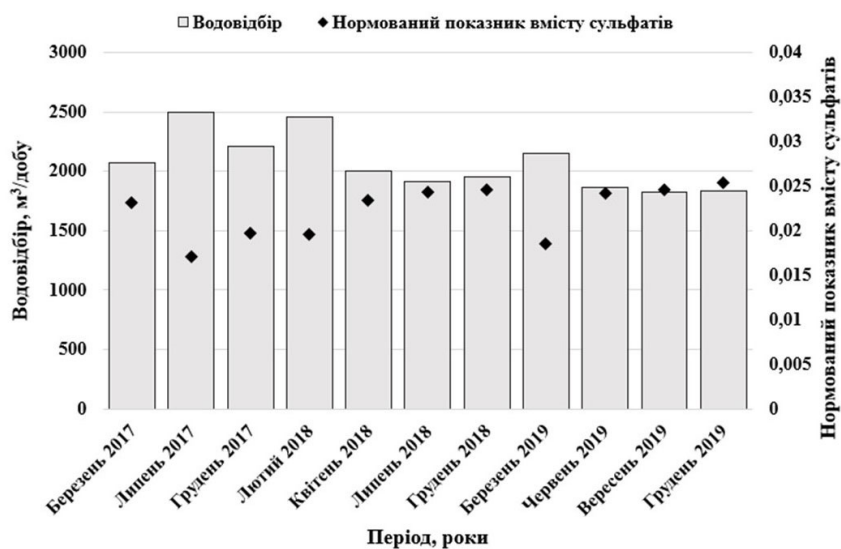


Рис. 3. Нормовані показники вмісту сульфатів та водовідбору з водоносного горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання в період 2017–2019 рр.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було виявлено такі особливості хімічного складу питних підземних вод на території Коростишівського району Житомирської області.

1. Досліджені зразки підземних вод з водоносних горизонтів в алювіальних відкладах першої – другої надзаплавних терас верхнього неоплейстоцену ($a^{1-2}P_{III}$) і у тріщинуватій зоні кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання (PR_1) за макроелементним складом відповідають нормативам ДСанПіН 2.2.4-171-10 для питної води з колодязів, каптажів та джерел. Виключенням є вміст нітратів, концентрація яких у криницях станом на 2020 рік незначною мірою перевищувала ГДК ($52,77 \text{ мг/дм}^3$ порівняно з нормативом у 50 мг/дм^3).

2. Проаналізовано зміни в часі величини загальної мінералізації, вмісту іонів Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} та Cl^- у водоносному горизонті тріщинуватої зони кристалічних порід та їхньої кори вивітрювання за період березень 2017 – грудень 2019 рр. за експлуатаційними свердловинами Коростишівського МКП "Водоканал". Оскільки статистичний розподіл даних у вибірках, що розглядалися, відповідає нормальному закону, були обраховані коефіцієнти кореляції Пірсона. Виявлено високу позитивну кореляцію між концентраціями Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- та їх нормованими показниками за величиною водовідбору. Коефіцієнти кореляції Пірсона R становили, відповідно: для Mg^{2+} $R=0,82$; для SO_4^{2-} $R=0,63$; для Cl^- $R=0,76$. Отримані результати показали, що при збільшенні водовідбору з досліджуваного водоносного горизонту підвищується вміст мінеральних речовин, що свідчить про істотну роль антропогенного чинника при формуванні хімічного складу досліджуваних підземних вод.

3. Порівняння БЗК із вмістом мікроелементів та окремих мікроелементів, визначених при виконанні дослідження, надало змогу виявити особливості: у досліджуваних водах спостерігається надлишок таких елементів, як Sr та Ba. У достатній кількості присутній Cr. Натомість було виявлено недостатню кількість таких елементів, як Li, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd та Pb. Варто зазначити, що у 2021 році (порівняно із 2020 роком) концентрація Ni та Zn в обстежених водозабірних спорудах значно зросла: концентрація Ni – у 75 разів у колодязях та у 20 разів у свердловинах, концентрація Zn – у 9 разів у колодязях та у 3 рази у свердловинах. Імовірно, таке явище пов'язано з тим, що ці елементи мають техногенне походження, тому їхня концентрація у досліджуваних підземних водах стрімко зростає. Загалом, порівнюючи результати мікроелементного аналізу, виконаного у 2020 та 2021 роках, можна говорити про наявність тенденції до збільшення концентрацій досліджуваних мікроелементів у підземних водах, однак ця гіпотеза потребує уточнення за рахунок подальших моніторингових спостережень.

4. Зважаючи на те, що місцеве населення вживає досліджувану воду постійно, а вона є основним джерелом надходження біологічно значущих хімічних елементів до організму, на цій території існують ризики виникнення геохімічних ендемій.

Робота виконана в рамках наукової теми 0118U003167 "Геохімія есенціальних елементів у природних і техногенних ландшафтах лісостепової зони України як основа біогеохімічного районування" Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семченка НАН України.

Список використаних джерел

- Авицын, А.П., Жаворонков, А.А. (1991). Микроэлементозы человека. Монография. М.: Медицина.
Барвиш, М.В., Шварц, А.А. (2000). Новый подход к оценке микрокомпонентного состава подземных вод, используемых для питьевого

водоснабжения. *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 5, 467–473.

Гребенюк, М., Цимбал, Д. (2020). Повторна геолого-економічна оцінка експлуатаційних запасів Коростишівського родовища питних підземних вод по свердловинах Коростишівського МКП "Водоканал" в м. Коростишів Житомирської області (підрахунок запасів станом на 01.01.2020). *Науковий звіт*. Київ: ТОВ "Гео Пошук".

Злобіна, К.С. (2013). Геохімія питних артезіанських вод бортової частини Дніпровського артезіанського басейну (на прикладі м. Київ). *Автореф. дис. ... канд. геол. наук*. Київ.

Кондратюк, В.А. (1989). Микроэлементы, значимость для здоровья в питьевой воде малой минерализации. *Гигиена и санитария*, 2, 81–82.

Крайнев, В.С., Рьженко, Б.Н., Швеи, В.М. (2004). Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Монография. М.: Наука.

Лютый, Г.Ф. (1992). Влияние минерального состава питьевой воды на здоровье населения. *Гигиена и санитария*, 1, 13–15.

Мезенцева, Н.І., Батиченко, С.П., Мезенцев, К.В. (2018). Захворюваність і здоров'я населення в Україні: суспільно-географічний вимір. Монографія. Київ: Принт Сервіс.

Рудько, Г. (2012). Медична геологія – новий напрям розвитку науки та практики. *Геолог України*, 4, 48–51.

Синицына, О.О., Плитман, С.И., Амплеева, Г.П., Гильденскиольд, О.А., Ряшенцева, Т.М. (2020). Эссенциальные элементы и их нормирование в питьевой воде. *Анализ риска здоровью*, 3, 30–38. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.04>.

Скальный, А.В., Рудаков, И.А. (2004). Биоэлементы в медицине. Монография. М.: Мир.

Golekar, R.B., Patil, S.N., Baride, M. V. (2013). Human health risk due to trace element contamination in groundwater from the Anjani and Jhiri river catchment area in northern Maharashtra, India. *Earth Sciences Research Journal*, 17(1), 17–23.

Koshliakova, T., Kuraieva, I., Koshliakov, O. (2020). Study of microelement composition of potable groundwater in Korostyshiv district of Zhytomyr region in hydrogeochemical monitoring system. *Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 2020 November 10–13, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056020>.

Hussain, S., Habib-Ur-Rehman, M., Khanam, T., Sheer, A., Kebin, Zh., Jianjun, Y. (2019). Health Risk Assessment of Different Heavy Metals Dissolved in Drinking Water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16. doi:10.3390/ijerph16101737.

References

- Avitsyn, A.P., Zhavoronkov, A.A. (1991). Human microelementosis. Monograph. Moscow: Medicine. [in Russian]
Barvish, M.V., Shvarts, A.A. (2000). A new approach to assessing groundwater microcomponent composition used for potable water supply. *Geoeology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 5, 467–473. [in Russian]
Golekar, R.B., Patil, S.N., Baride, M. V. (2013). Human health risk due to trace element contamination in groundwater from the Anjani and Jhiri river catchment area in northern Maharashtra, India. *Earth Sciences Research Journal*, 17(1), 17–23.
Grebnyuk, M., Tsymbal, D. (2020). Repeated geological and economic assessment of operational reserves of Korostyshiv potable groundwater deposit in Korostyshiv utility company "Vodokanal" wells in Korostyshiv, Zhytomyr region (calculation of reserves as of 01.01.2020). *Research report*. Kyiv: Ltd. "GeoPoshuk". [in Ukrainian]
Zlobina, K.S. (2013). Geochemistry of artesian drinking water on board the Dnieper artesian basin (on the example of Kyiv). *Extended abstract of Candidate's thesis*. [in Ukrainian]
Konratyuk, V.A. (1989). Trace elements, significance for health in drinking water of low mineralization. *Hygiene and sanitation*, 2, 81–82. [in Russian]
Koshliakova, T., Kuraieva, I., Koshliakov, O. (2020). Study of microelement composition of potable groundwater in Korostyshiv district of Zhytomyr region in hydrogeochemical monitoring system. *Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 2020 November 10–13, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056020>.
Kraev, V.S., Ryzhenko, B.N., Shvets, V.M. (2004). Underground waters geochemistry. Theoretical, applied and ecological aspects. Monograph. Moscow: Nauka Publishing. [in Russian]
Lyutai, G.F. (1992). Influence exerted by mineral structure of drinking water on population health. *Hygiene and sanitation*, 1, 13–15. [in Russian]
Mezentseva, N.I., Batychenko, S.P., Mezentsev, K.V. (2018). Morbidity and health of Ukraine population: socio-geographic dimension. Monograph. Kyiv: Print Servis. [in Ukrainian]
Rudko, H. (2012). Medical geology is a new direction in the development of science and practice. *Geologist of Ukraine*, 4, 48–51. [in Ukrainian]
Hussain, S., Habib-Ur-Rehman, M., Khanam, T., Sheer, A., Kebin, Zh., Jianjun, Y. (2019). Health Risk Assessment of Different Heavy Metals Dissolved in Drinking Water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16. doi:10.3390/ijerph16101737.
Sinitsyna, O.O., Plitman, S.I., Ampleeva, G.P., Gil'denskiol'd, O.A., Ryashentseva, T.M. (2020). Essential elements and standards for their contents in drinking water. *Health Risk Analysis*, 3, 30–38. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.04> [in Russian]
Skal'nyi, A.V., Rudakov, I.A. (2004). Bioelements in medicine. Monograph. Moscow: Mir Publishing. [in Russian]

Надійшла до редколегії 14.11.22

T. Koshliakova, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: tatianakoshliakova@gmail.com;
I. Kuraieva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: KI4412674@gmail.com;
M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine,
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine;
O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: kosh_57@ukr.net,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
L. Oleksenko, Dr. Sci. (Chem.), Prof.,
E-mail: olexludmil@ukr.net,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Chemical Faculty, 12 Tolstogo Str., Kyiv, 01033, Ukraine;
I. Shvaika, PhD (Geol.), Researcher,
E-mail: ishvaika@gmail.com;
L. Proskurka, Junior Researcher,
E-mail: igmrproskurko@gmail.com,
M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine,
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine

MICROELEMENT COMPOSITION OF POTABLE GROUNDWATER IN KOROSTYSHIV DISTRICT OF ZHYTOMYR REGION IN HYDROGEOCHEMICAL MONITORING SYSTEM

The paper is devoted to the study of microelement composition of potable groundwater in Korostyshiv district of Zhytomyr region in terms of potential threats to human health. The study was conducted as part of general monitoring studies set of groundwater quality in the region in July 2020 – August 2021. Microelement analysis of water samples was performed by use of modern highly sensitive method of mass spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS).

The results obtained may be useful to justify the need to adjust the diet of local residents through the additional use of vitamin and mineral complexes.

Keywords: potable groundwater, microelement composition, hydrogeochemistry, monitoring, essential elements, technogenic influence.

УДК [54.01:54.02]:550.4:574

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.12>Ю. Литвиненко, канд. техн. наук, пров. наук. співроб.,
E-mail: yu.lytvynenko@ukr.net;Т. Мельниченко, канд. біол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: tim--@ukr.net, тел. 096-440-79-06;В. Кадошніков, наук. співроб.,
E-mail: kvm_2020@ukr.net;В. Шкапенко, канд. геол. наук,
E-mail: shkapenko.viktoriya@gmail.com;ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України",
просп. Академіка Палладіна, 34а, Київ, 03142, Україна

АРХЕОЛОГІЧНІ СТЕКЛА – МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ОСКЛОВАНИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

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

Розглянуто можливість використання археологічних стекол для прогнозування поведінки радіонуклідів, інкорпорованих у скломатрицю, в умовах приземного зберігання за їх тривалого контакту із ґрунтовими водами. Досліджено археологічні стекла, вік яких становить понад 2 тис. років, що відібрані з культурного горизонту археологічного заповідника Ольвія. При тривалому контакті з ґрунтом на поверхні скла утворюється гелевий шар, на зовнішній поверхні якого формуються шаруваті алюмосилікати. Формування захисного шару скла відбувається за механізмом інконгруентного розчинення. Експериментально встановлено, що при вилугуванні зі скла активно виносяться лужні та лужноземельні елементи (Na, Ca), частково кремній і залізо за практичної нерухомості алюмінію. Моделювання руйнування скла проводилось у екстракторах Сокслета в умовах безперервного впливу протягом 6 місяців гарячої ($t = 75\text{--}80^\circ\text{C}$) води, насиченої діоксидом вуглецю. Зміна швидкості виносу компонентів зі скла пов'язана зі збільшенням потужності "запального" гелевого шару, товщина якого збільшується із часом. Циклічні зміни швидкості розчинення скла пов'язані із частковим руйнуванням гелевого шару, що обумовлено збільшенням товщини останнього і, відповідно, зменшенням адгезії гелю до скла. Результати вивчення руйнування алюмосилікатних (археологічних) стекол і порівняння їх із результатами дослідження руйнування боросилікатних стекол свідчать про те, що археологічні стекла можуть бути моделлю для прогнозування поведінки в природних умовах протягом століть скломатриць, призначених для компактування радіоактивних відходів.

Ключові слова: рідкі радіоактивні відходи, компактування, археологічні й боросилікатні стекла, алюмосилікати, захисний гелевий шар, швидкість вилугування.

Постановка проблеми. На атомних електростанціях (АЕС) України накопичено велику кількість твердих і рідких відходів, загальний обсяг яких оцінюється у 33,17 (7,1 тис. м³ соляного плаву, 10,0 тис. м³ кубового залишку) і 18,57 тис. м³, відповідно (Стратегія поводження ..., 2009; Ольховик, 2014; Свидерский и др., 2019). Особливі труднощі виникають при зберіганні рідких радіоактивних відходів (РРВ), які накопичуються у сховищах АЕС у вигляді кубового залишку із солемістом від 200 до 600 г/дм³ або у вигляді соляного плаву з більш високою концентрацією солей (International Atomic Energy Agency, 2001). Крім радіоактивних відходів (РАВ), що утворюються на АЕС, існують також інші джерела їх утворення (Свидерский и др., 2019), при цьому максимальну кількість РАВ на теперішній час зосереджено в зоні Чорнобильської АЕС (Стратегія поводження ..., 2009). Необхідність розробки і реалізації ефективних технологій переробки РРВ обумовлює розв'язання першочергового завдання – організації переробки та кондиціонування новоутворених і накопичених РРВ (International Atomic Energy Agency, 2001). При цьому ефективність пропонованих до реалізації технологій має визначатися не лише вартістю використовуваних матеріальних ресурсів, а й обсягами компаундів, які отримуються в результаті переробки, що визначає ефективність подальших етапів технології поводження з РАВ – транспортування та захоронення (Ojovan et al., 2013).

З огляду на реальні гірничо-геологічні умови у США і РФ рідкі радіоактивні відходи низької та середньої активності (НСАВ) можна закачувати безпосередньо в геологічні формації, у яких контакт із підземними водами зведений до мінімуму. У Хенфорді (США) для локалізації рідких НСАВ у ґрунтах застосовували метод їх закачування в дрібні неглибокі виробки типу шурфів, траншей і свердловин (Beard et al., 1967).

Закачування рідких РАВ у глибокі водоносні горизонти – це спосіб захоронення, використання якого набуло поширення в 1960-ті роки в СРСР і продовжується в РФ до цього часу (Лаверов и др., 2009). Спосіб закачування РРВ для їх ізоляції в глибинні пласти має значну економічну ефективність і свого часу активно пропагувався на міжнародних симпозиумах МАГАТЕ (Захаров и др., 1967; Spitsyn et al., 1967). Проте за кордоном не поспішають упроваджувати ці технології у себе.

Для України найдоцільнішим і економічно рентабельним є компактування РРВ у цементну або скломатрицю, які здатні забезпечити мінімальну швидкість міграції радіонуклідів у навколишнє середовище. Відомі такі основні технології компактування НСАВ – бітумування, цементування, включення РРВ у полімерну матрицю (Jantzen et al., 2013). Зазначені технології є економічно привабливими, проте мають значний рівень пожежонебезпеки і низький рівень щодо механічної, хімічної і біологічної стійкості. Істотним недоліком методу цементування є відносно висока міграція радіонуклідів із цементного блока, що має невисоку механічну міцність. Цих недоліків позбавлені компаунди з боросилікатного скла, у яке інкорпоровано радіонукліди. Дослідження стійкості боросилікатних стекол в умовах відкритого наземного зберігання показало, що в результаті впливу факторів навколишнього середовища на оскловані НСАВ на поверхні склоблоків утворюється шар, що перешкоджає міграції компонентів скла в навколишнє середовище (Соболев и др., 1990). Швидкість вилугування компонентів скла із часом (тривалість експерименту 10–20 років) зменшується у 2–5 разів, причому активність поверхневого шару зменшується в 1,7 рази (Лаверов и др., 2009).

Істотний вплив на хімічну стійкість скла має природа мінералів, що контактують зі склом, і склад дренажних

вод. У лабораторних умовах досліджувалося вилугування компонентів скла рівноважними водними розчинами, які контактували з бентонітами. Встановлено, що бентонітова вода значно прискорює руйнування скла порівняно з каоліновою і мінеральною водами (Мартынов *и др.*, 2015), що, на нашу думку, пов'язано з більш високим вмістом лугів у бентонітовій воді. Вплив морської води на руйнування археологічних стекол оцінювали за станом зразка скла, яке знайдено в Середземному морі на глибині 56 м і перебувало там за температури 17 °C понад 1800 років (Corrosion and Alteration, 2010). Незважаючи на вільний доступ до поверхні скла свіжої морської води, максимальна потужність зони гідратації поверхні такого скла за вказаний період становила всього 0,5 мм.

Істотним чином на руйнування скла впливає кремнієва кислота, яка присутня в розчинах. Проте швидкість розчинення скломатриці можливо кардинально зменшити шляхом введення аморфного кремнезему в зону контакту із вміщуючими породами. Показано (Лаверов *и др.*, 2009), що швидкість розчинення скломатриці в системі "скло – бентоніт" після 364 днів взаємодії за температури 60 °C становила 0,1 г/м²·на добу, а в системі "скло – аморфний кремнезем" – не більше 10⁻³ г/м²·на добу.

Вивчення розчинності блоків осклованих НСАВ, розміщених у морених відкладеннях у зоні аерації на глибині 1,7–4,0 м, за потужності зони промерзання 0,7 м і температури 4–14 °C показало (Лаверов *и др.*, 2009), що склад поверхневого шару склоблоків, які перебувають на зберіганні у відкритому поверхневому сховищі, і таких, які перебувають в умовах приповерхневого захоронення, аналогічний, що, у свою чергу, дозволяє порівнювати процеси корозії стекол, що знаходяться в різних умовах. Зокрема, радіоактивність проб води, що були в контакт з склом протягом періоду від 1 до 17 років, зменшилася в 10 разів.

Наразі немає однозначної думки про механізм формування поверхневого шару скла, товщина і склад якого визначають швидкість міграції радіонуклідів зі скломатриці. Однак недоліком досліджень, проведених як у лабораторних умовах, так і в натурних експериментах, є значні труднощі інтерпретації отриманих даних при оцінюванні стійкості скломатриць для компактування НСАВ у перспективі сотень і тисяч років.

Метою досліджень було вивчення археологічних стекол для визначення механізму утворення

поверхневого шару скла, що визначає стійкість призначених для компактування радіоактивних відходів скломатриць у природних умовах протягом століть.

Матеріали та методи. Під час роботи археологічної експедиції на території історико-археологічного заповідника Ольвія (сел. Порутіно Миколаївської області) відібрано партію стекол із культурного горизонту (Manichev *et al.*, 2005). Вік скла визначено за археологічними даними і підтверджено даними радіовуглецевого аналізу.

Для оцінювання мінерального складу ґрунту, який безпосередньо контактував зі стеклами, застосовано рентгенівську дифрактометрію. Для вимірювань застосовували рентгенівський дифрактометр ДРОН-3М із використанням монохроматичного Cu-K α випромінювання за стандартною методикою, параметри – U = 30 kV, I = 30 mA.

Дослідження показали, що мінеральний склад ґрунту, який тривалий час контактував зі стеклами, представлений гідроксидом (ілліт), смектити (монтморилоніт, нонтроніт), каолінитом. Крім глинистих мінералів, у досліджуваному зразку виявлено високодисперсний кварц, кальцит, польовий шпат. Для вивчення структури стекол використовували дані оптичної мікроскопії із застосуванням оптичного поляризаційного мікроскопа МИН-8. Для дослідження складу і структури стекол із ділянки сколу скла виготовляли спеціальний шліф. Хімічний склад незмінного скла і прилеглого до нього шару оцінювали за допомогою автоемісійного скануючого електронного мікроскопа JSM-6700F із приставкою для енергодисперсійного мікроаналізу INCA Wave (Oxford Instruments) марки JEOL виробництва Японії. Вміст SiO₂ у розчині визначали фотометричним методом, що ґрунтується на утворенні комплексної сполуки кремнемолібденової гетерополікислоти і відновленні її аскорбіновою кислотою до кремнемолібденової сині з подальшим вимірюванням оптичної густини розчинів на фотоколориметрі КФК-3. Вміст іонів Na у розчині визначали методом пом'якої фотометрії на фотометрі FLAFO-4.

Результати та обговорення. Зовнішній вигляд археологічного скла, підданого часовій корозії, вік якого становить понад 2 тис. років, наведено на рис. 1 (Manichev *et al.*, 2005).

Товщину зруйнованого (зміненого) шару визначали методами оптичної мікроскопії шліфів стекол. Тонкий шліф скла СП-132/17 у наскрізному світлі наведено на рис. 2.

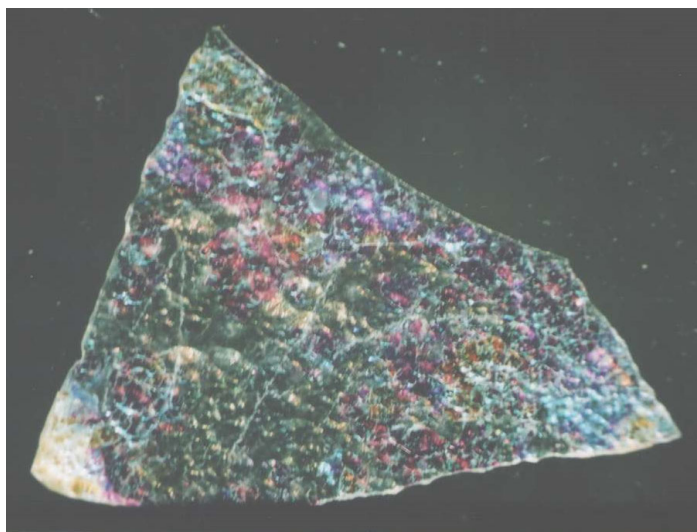


Рис. 1. Зразок археологічного скла, вік якого понад 2 тис. років

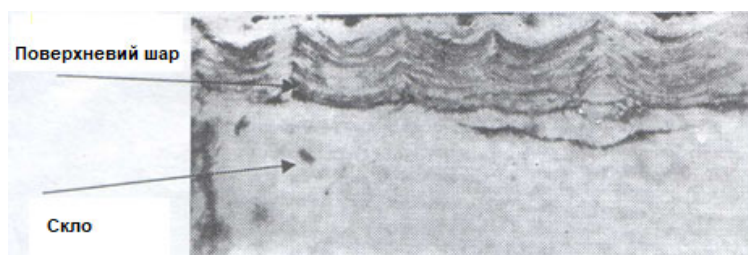


Рис. 2. Тонкий зріз скла СП-132/17 у наскрізному світлі (× 250)

З отриманих даних видно, що на поверхні скла протягом його тривалого зберігання у ґрунті (культурний горизонт) утворюється гелевий шар, що безпосередньо прилягає до скла, у якому із часом утворюються шаруваті алюмосилікати структурного типу 2 : 1. Дослідження показали, що за період ~ 2,5 тис. років у результаті вилугування компонентів скла на його поверхні

утворюється "запірний" шар завтовшки ~ 1,5 мм, що перешкоджає подальшому вилугуванню компонентів такого скла. Швидкість утворення "запірного" шару становить 500–600 нм на рік.

Хімічний склад незміненого шару скла СП-132/17 і вивіреної його частини ("запірний" шар) за даними енергодисперсійного мікроаналізу наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад (без урахування аніонів скла) незміненого шару скла СП-132/17 (точка Е) та його зміненого поверхневого шару (точки А, В)

№	Елемент	Вміст елемента у профілі (від краю до центра скла), %		
		А	В	Е
1	Al	1,99	1,94	1,37
2	Si	26,08	20,0	35,1
3	Mg	0,73	0,05	0,28
4	Na	0,12	0,20	2,7
5	K	1,22	1,63	0,26
6	Fe	0,28	0,24	0,25
7	Ca	0,37	0,29	5,50
8	Mn	0,01	0,007	0,012
9	Ti	0,011	0,0	0,031
	Сума	30,81	24,36	45,50

З таблиці видно, що зі скла у ґрунт інтенсивно виносяться іони Na, Ca і, частково, кремнієвої кислоти за практичної нерухомості іонів Al та Fe, що спричинює накопичення цих елементів у змінній частині скла. Такий характер руйнування стекол аналогічний руйнуванню гірських порід у процесі гіпергенезу, за якого активно виносяться великі іони лужних і лужноземельних елементів і, частково, кремнієвої кислоти, а поверхневий шар збагачується катіонами Al, Ti і, меншою мірою, Fe. Збільшення вмісту K у зміненому шарі скла пов'язане з утворенням гідролітів з аморфного гелевого шару.

Дослідження кінетики вилугування лужних катіонів та кремнієвої кислоти проводили гарячою ($t = 75 - 80^{\circ}\text{C}$)

водою в атмосфері CO_2 в екстракторі Сокслета протягом 6 місяців за методикою, яка застосовується при вивченні вилугування з каркасних і шаруватих алюмосилікатів (Куркина и др., 1980). Зразки археологічних стекол подірювали до фракції 0,1–1 мм і вміщували в патрон із фільтрувального папера в центральній частині екстрактора Сокслета, через зворотний холодильник здійснювали безперервну подачу діоксиду вуглецю. Періодично з колб-приймачів відбирали зразки екстракту, у яких визначали вміст Na і SiO_2 .

Кінетика зміни швидкості виносу натрію і кремнієвої кислоти зі скла із часом наведена на рис. 3.

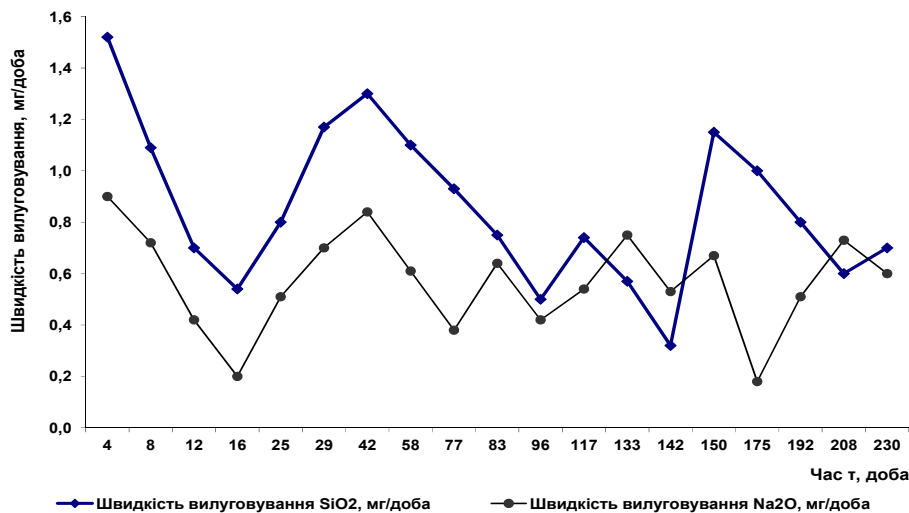


Рис. 3. Швидкість вилугування скла з 1 м²

З наведеного рисунка видно, що швидкість виносу кремнію і натрію змінюється із часом. На початковому етапі вилугування (до 16 діб) винос натрію і кремнію зменшується, причому швидкість виносу для цих елементів різна, що обумовлено інконгруентним механізмом розчинення скла. Розчинення скла супроводжується утворенням фази, подібної до такої, що утворюється при розчиненні боросилікатних стекол (Лаверов *и др.*, 2013), що пов'язано з утворенням "запірного" гелевого шару, через який відбувається міграція у розчин зазначених компонентів. Через 16 діб експерименту швидкість виносу Na_2O і SiO_2 збільшується, разом з тим швидкість їх вилугування суттєво менша, ніж на початковому етапі. Зміна швидкості виносу компонентів зі скла із часом має подібний характер, але відрізняється все меншою інтенсивністю. Циклічну зміну швидкості розчинення скла ми пов'язуємо із частковим руйнуванням гелевого шару, коли адгезія гелю до скла менша за сили міжмолекулярної взаємодії всередині гелевого шару, що спричинює відшарування (злущування) останнього від товщі скла. Такий процес зумовлює зменшення товщини "запірного" шару. Порівнюючи отримані нами дані з даними вивчення процесу розчинення боросилікатних стекол із часом, не можна однозначно стверджувати, що за певний відрізок часу міграція елементів зі скла повністю припиниться.

Аналогічні результати були отримані при вивченні процесу вилугування з фосфатних стекол водними розчинами різного складу (дистильована вода; імітант підземних вод; вода, що перебуває в термодинамічній рівновазі з каоліном або бентонітом) у лабораторних умовах за температури 25 і 90 °C (Мартынов *и др.*, 2015). Спільною рисою вилугування зі скла для всіх розчинів за зазначених температур було зниження швидкості зі збільшенням тривалості вилугування. У деяких випадках для початкових інтервалів вилугування спостерігалось зменшення швидкості вилугування, яка потім швидко зростала і, пройшовши максимум, вписувалася в загальний тренд. Причина таких процесів може полягати у відмінностях властивостей поверхневих шарів зразків скла і матриці. Причому зазначені відмінності пов'язані, найімовірніше, зі структурою поверхні скла, наприклад шорсткістю, а не з його складом.

Результати вивчення процесу вилугування боросилікатних стекол в умовах натурних експериментів на відкритому повітрі та при приповерхневому їх захороненні (Лаверов *и др.*, 2013) ідентичні й полягають в утворенні "запірного" шару на поверхні розділення фаз. Вкрай низька розчинність стекол при взаємодії з ґрунтовими і поровими водами за низьких температур гарантує безпеку сховищ. Основні фактори, що обумовлюють високі ізоляційні властивості скломатриці, – низька температура й утворення на поверхні скла захисного гелевого шару. Досвід вивчення природних і штучних стекол показав, що при взаємодії із ґрунтовими і поровими водами у всіх випадках утворюється зовнішній шар зміненого скла, який виконує роль бар'єра, істотно сповільнює процес міграції радіонуклідів із товщі скла в навколишнє середовище. Згодом товщина зміненого шару збільшується, а швидкість міграції радіонуклідів зменшується на порядки.

З урахуванням недостатності даних про вплив аніонних компонентів на зміну властивостей поверхневого шару скломатриці, які мають певне значення для міграції інкорпорованих у скломатрицю радіонуклідів, вважаємо перспективними подальші дослідження з вивчення зміненого поверхневого шару скломатриці.

Висновки. Підсумовуючи сказане, зазначимо:

1. На території археологічного заповідника Ольвія (сел. Пурутіно Миколаївської обл.) з культурного горизонту відібрані зразки археологічних стекол, вік яких становить

понад 2 тис. років. Дослідження зміненої поверхні зразків показали, що при тривалому контакті з ґрунтом на поверхні скла утворюється корозійний шар. Встановлено, що безпосередньо до поверхні незміненого скла прилягає гелевий шар, формування якого відбувається за механізмом інконгруентного розчинення внаслідок нерівності хімічних потенціалів компонентів скла та дренуючих розчинів.

2. Зі скла у ґрунт інтенсивно виносяться лужні та лужноземельні катіони (Na, Ca), частково кремній і залізо, за практичної нерухомості алюмінію. З компонентів скла, що залишилися, формується гелевий шар, з якого згодом утворюються шаруваті алюмосилікати.

3. Лабораторне дослідження кінетики руйнування археологічних стекол водою, насиченою діоксидом вуглецю, за температури $t = 75\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ в екстракторі Сокслета протягом 6 місяців показало, що швидкість виносу компонентів зі скла змінюється із часом. При вилугуванні зі скла активно виносяться лужні й лужноземельні елементи, частково кремній і залізо, за практичної нерухомості алюмінію, що обумовлено інконгруентним механізмом розчинення. Зміна швидкості виносу компонентів зі скла пов'язана зі збільшенням потужності "запірного" гелевого шару, товщина якого збільшується із часом. Циклічні зміни швидкості розчинення скла пов'язані із частковим руйнуванням гелевого шару, що обумовлено збільшенням товщини гелевого шару і, відповідно, зменшенням адгезії гелю до скла.

4. Досвід вивчення природних і штучних стекол показав, що при взаємодії з ґрунтовими і поровими водами у всіх випадках утворюється зовнішній шар зміненого скла, який виконує роль бар'єра, істотно сповільнює процес міграції радіонуклідів із товщі скла в навколишнє середовище. Згодом товщина зміненого шару збільшується, а швидкість міграції радіонуклідів зменшується на порядки.

5. Результати вивчення руйнування алюмосилікатних (археологічних) стекол і порівняння з результатами дослідження руйнування боросилікатних стекол свідчать про те, що археологічні стекла можуть бути моделлю для прогнозування поведінки у природних умовах протягом століть скломатриць, призначених для компактування РАВ.

Список використаних джерел

- Захаров, С.И., Багрецов, В.Ф., Пименов, М.К. и др. (1967). Некоторые результаты эксплуатации опытно-промышленной установки по удалению жидких радиоактивных отходов в глубинные формации земной коры. *Disposal of Radioactive Wastes into the Ground, IAEA/ENEA Symposium Proceedings, May, 29 – June, 2, Vienna, Austria, 577–590.*
- Куригина, Э.Б., Кадошников, В.М., Островская, А.Б., Куковский, Е.Г. (1980). Экспериментальные исследования растворимости алюмосиликатов в условиях гипергенеза. Устойчивость слоистых и каркасных алюмосиликатов. *Минерал. журн.*, 2 (6), 14–21.
- Лаверов, Н.П., Дмитриев, С.А., Величин, В.И., Омеляненко, Б.И. (2009). Условия безопасной изоляции жидких отходов низкого и среднего уровня радиоактивности. *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 3, 195–213.
- Лаверов, Н.П., Омеляненко, Б.И., Юдинцев, С.В., Стефановский, С.В., Никонов, Б.С. (2013). Стекла для иммобилизации отходов низкого и среднего уровней радиоактивности. *Геология рудных месторождений*, 55 (2), 87–113. <http://dx.doi.org/10.7868/S0016777013020032>
- Мартынов, К.В., Константинова, Л.И., Захарова, Е.В. (2015). Влияние температуры на выщелачивание модельного фосфатного стекла с имитаторами радиоактивных отходов. *Вопросы радиационной безопасности*, 4 (80), 10–21.
- Ольховик, Ю.А. (2014). Об остекловывании жидких радиоактивных отходов АЭС. *Ядерная та радіаційна безпека*, 4 (64), 46–50.
- Свидерский, В.А., Глуховский, В.В., Глуховский, И.В., Дашкова, Т.С. (2019). Технологии отверждения жидких радиоактивных отходов. *Ядерная та радіаційна безпека*, 1 (81), 68–74. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).12](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).12)
- Соболев, И.А., Барин, А. С., Ожован, М. И. (1990). Испытания в натурных условиях продуктов отверждения радиоактивных отходов. *Атомная энергия*, 69 (5), 306–309.
- Стратегія поводження з радіоактивними відходами в Україні. (2009). Затв. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2009 р. № 990-р.

Beard, S.J., Godfrey, W.L. (1967). Waste disposal into the ground at Hanford. *Disposal of Radioactive Wastes into the Ground, IAEA/ENEA Symposium Proceedings, May, 29 – June, 2, Vienna, Austria*, 123–133.

Corrosion and Alteration of Nuclear Materials. (2010). Paris: CEA. International Atomic Energy Agency: Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications. (2001). TRS No. 402, IAEA: Vienna, Austria.

Jantzen, C.M., Lee, W.E., Ojovan, M.I. (2013). Radioactive waste (RAW) conditioning, immobilization, and encapsulation processes and technologies: overview and advances. *Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-Up, Article 6*, 171–272. <https://doi.org/10.1533/9780857097446.1.171>

Manichev, V., Demchenko, L., Zlobenko, B., Kadoshnikov, V., Spasova, L. (2005). The stability of the ancient metal and glass from archaeological sites of the northern Prichernomor'e (Ukraine) and their physical and chemical interactions with their burial environment. *Anthropogenic analogues for geological disposal of high level and long lived waste: Final report of a coordinated research project 1999–2004, Vienna, Austria: IAEA*, 55–71.

Ojovan, M., Lee, W. (2013). *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*. 2nd Edition, Elsevier.

Spitsyn, V.I., Pimenov, M.K., Yudin, F.P., Balukova, V.D. (1967). Scientific prerequisites for utilizing deep-lying formations for burying liquid radioactive wastes. *Disposal of Radioactive Wastes into the Ground, IAEA/ENEA Symposium Proceedings, May, 29 – June, 2, Vienna, Austria*, 563–576.

References

Beard, S.J., Godfrey, W.L. (1967). Waste disposal into the ground at Hanford. *Disposal of Radioactive Wastes into the Ground, Proc. Symp., 1967, May, 29 – June, 2, Vienna, IAEA and ENEA*, 123–133.

Corrosion and Alteration of Nuclear Materials. (2010). Paris: CEA. International Atomic Energy Agency: Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications. (2001). TRS No. 402, IAEA: Vienna, Austria.

Jantzen, C.M., Lee, W.E., Ojovan, M.I. (2013). Radioactive waste (RAW) conditioning, immobilization, and encapsulation processes and technologies: overview and advances. *Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-Up, Article 6*, 171–272. <https://doi.org/10.1533/9780857097446.1.171>

Kurkina, E.B., Kadoshnikov, V.M., Ostrovskaya, A.B., Kukovsky, E.G. (1980). Experimental studies of solubility of aluminosilicates under hypergenesis. Stability of layered and frame aluminosilicates. *Mineral. Journal*, 2 (6), 14–21. [in Russian]

Laverov, N.P., Dmitriev, S.A., Velichkin, V.I., Omelyanenko, B.I. (2009). Conditions for safe isolation of liquid waste of low and medium level of radioactivity. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 3, 195–213. [in Russian]

Laverov, N.P., Omel'yanenko, B.I., Yuditsev, S.V., Nikonov, B.S., Stefanovsky, S.V. (2013). Glasses for immobilization of low- and intermediate-level radioactive waste. *Geology of Ore Deposits*, 55 (2), 87–113. <http://dx.doi.org/10.7868/S0016777013020032> [in Russian]

Manichev, V., Demchenko, L., Zlobenko, B., Kadoshnikov, V., Spasova, L. (2005). The stability of the ancient metal and glass from archaeological sites of the northern Prichernomor'e (Ukraine) and their physical and chemical interactions with their burial environment. *Anthropogenic analogues for geological disposal of high level and long lived waste: Final report of a coordinated research project 1999–2004, Vienna, Austria: IAEA*, 55–71.

Martynov, K.V., Konstantinova, L.I., Zakharova, E.V. (2015). Temperature Effects on the Leaching of Simulated Phosphate Glass Containing Radioactive Waste Simulants. *Radiation Safety Problems*, 4 (80), 10–21. [in Russian]

Ojovan, M., Lee, W. (2013). *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*. 2nd Edition, Elsevier.

Olkhovik, Yu. (2014). Vitrification of NPP Liquid Boron-Containing Radioactive Waste. *Nuclear and radiation safety*, 4 (64), 46–50. [in Russian]

Radioactive waste management strategy in Ukraine: approved. (2009). By the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of August 19, 2009 № 990-r. [in Ukrainian]

Sobolev, I.A., Barinov, A.S., Ozhovan, M.I. (1990). Full Scale Tests of Radioactive Waste Solidification Products. *Atomic Energy*, 69 (5), 306–309. [in Russian]

Spitsyn, V.I., Pimenov, M.K., Yudin, F.P., Balukova, V.D. (1967). Scientific prerequisites for utilizing deep-lying formations for burying liquid radioactive wastes. *Disposal of Radioactive Wastes into the Ground, IAEA/ENEA Symposium Proceedings, May, 29 – June, 2, Vienna, Austria*, 563–576.

Svidersky, V., Glukhovskiy, V., Glukhovskiy, I., Dashkova, T. (2019). Liquid Radioactive Solidification Technologies. *Nuclear and Radiation Safety*, 1 (81), 68–74. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).12](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).12) [in Russian]

Zakharov, S.I., Bagretsov, V.F., Pimenov, M.K. et al. (1967). Some results of operation of pilot scale installation for disposal of liquid radioactive wastes in deep formations of earth's crust. *Disposal of Radioactive Wastes into the Ground, IAEA/ENEA Symposium Proceedings, May, 29 – June, 2, Vienna, Austria*, 577–590. [in Russian with English abs.]

Надійшла до редколегії 19.01.22

Yu. Lytvynenko, PhD (Tech.), Leading Researcher,

E-mail: yu.lytvynenko@ukr.net;

T. Melnychenko, PhD (Biol.), Senior Researcher,

E-mail: tim--@ukr.net;

V. Kadoshnikov, Researcher,

E-mail: kvm_2020@ukr.net;

V. Shkapenko, PhD (Geol.), Head of the lab.,

E-mail: shkapenko.viktoriya@gmail.com;

State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine",

34a Acad. Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine

ARCHAEOLOGICAL GLASSES – A MODEL FOR THE STABILITY EVALUATION OF THE VITRIFIED RADIOACTIVE WASTE

This article presents the possibility of usage of the archaeological glasses to predict the behavior of radionuclides incorporated into the glass matrix, under the conditions of the underground storage during prolonged contact with the groundwater. Archaeological glasses, whose age is more than two thousand years old, selected from the cultural horizon of the archaeological reserve "Olvia" were examined. A gel layer was formed on the surface of the glass prolonged contact with the soil, on the outer surface of which layered aluminosilicates are formed. The formation of a protective layer of the glass occurs by the mechanism of the incongruent dissolution. It has been experimentally established that alkaline and alkaline earth cations (Na, Ca), partially silicon and iron, are intensively removed into the soil during leaching from the glass, with the practical immobility of aluminum. Simulation of glass fracture was performed in Soxhlet extractors under conditions of continuous exposure to hot water ($t = 75\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$) saturated with carbon dioxide for 6 months. The change in the rate of components removal from the glass is connected with an increase in the thickness of the "locking" gel layer, the thickness of which increases over time. Cyclic changes in the dissolution rate of the glass are connected with the partial destruction of the gel layer due to the increase in thickness of the gel layer and, accordingly, a decrease in the adhesion of the gel to the glass. The results of the aluminosilicate (archaeological) glasses fracture study and their comparison with the results of the borosilicate glasses fracture study indicate that archaeological glasses can be a model for the predicting of the behavior in natural conditions of the glass matrices intended for radioactive waste volume reduction for centuries.

Keywords: liquid radioactive waste, volume reduction, archaeological and borosilicate glasses, aluminosilicates, protective gel layer, leaching rate.

ПОДІЇ

УДК 550.3:061

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.13>

П. Гришук, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: pgryshchuk@gmail.com,
член Товариства геофізиків-розвідників

20-РІЧЧЯ СТУДЕНТСЬКОГО ОСЕРЕДКУ ТОВАРИСТВА ГЕОФІЗИКІВ-РОЗВІДНИКІВ У КИЇВСЬКОМУ УНІВЕРСИТЕТІ!

Участь у міжнародних суспільствах сприяє одержанню додаткових знань

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

Геологічна освіта є основою для підготовки фахівців з вивчення природних ресурсів. Раціональне використання надр – це база економічного розвитку України, особливо в умовах енергетичного переходу. Навчальні заклади надають широкий спектр дисциплін з підготовки студентів геологічного спрямування. Засобом для отримання додаткових знань є участь у міжнародних осередках. Поширення фахових товариств серед закладів та підприємств є світовою практикою у багатьох країнах світу. Існує кілька геологічних асоціацій, які співпрацюють з Україною у сфері наук про Землю. У Київському національному університеті імені Тараса Шевченка на кафедрі геофізики двадцять років тому було започатковано студентський осередок Товариства геофізиків-розвідників (SEG). Долучення до нових можливостей було цікавим та корисним для студентів і викладачів. За програмами SEG студенти отримали нову комп'ютерну техніку, геофізичну літературу, освітні курси, відвідування лекторів, участь у міжнародних симпозиумах, можливість проведення польових таборів, стипендії тощо. Члени студентського осередку SEG Київського університету робили доповіді про свою діяльність на міжнародних конференціях і в навчальних закладах, запрошували фахівців з геологічної галузі, брали участь у геологічних вікторинах та конкурсах серед іноземних студентів, проводили геофізичні дослідження тощо. Члени секції SEG організували міжнародні геологічні дослідження у різних регіонах України, де проводили геофізичні знімання з вивчення старовинних споруд м. Кам'янець-Подільський, гіпсової печери Вертеба та палеовулканів поблизу м. Ужгород. У польових таборах взяли участь 49 студентів із 11 країн. Проводилися місцеві дослідження трубопроводів методами геофізики біля корпусу ННІ "Інститут геології" (м. Київ) та гори Тотоха, що у Київській області. Студенти виконували магніторозвідку, електротомографію, поверхневу сейсморозвідку, георадарні вишукування, геодезичні вимірювання та знімання з БПЛА. Діяльність осередку висвітлювалась на його зборах, де було зроблено понад 50 доповідей. За 20 років більше 100 студентів були членами секції SEG, яка стала основою для університетських гуртків AAPG та EAGE. У 2018 році Київський студентський осередок SEG було визнано найкращим у світі. Геофізична секція SEG зробила значну роботу з поширення геологічних знань і презентації Київського університету на міжнародному рівні.

Ключові слова: Товариство геофізиків-розвідників, куратор, студентський осередок, геологічний факультет, лектор, геологічна освіта, Київський університет, Інститут геології, геофізична секція, SEG, EAGE, AAPG.

Вступ. Розвиток сировинної бази є актуальним завданням для України. Це дає змогу мати енергетичну незалежність, розвивати економіку та підсилити національну безпеку держави. Розв'язання цього питання полягає у підготовці фахівців видобувної галузі, які володіють новітніми технологіями з вивчення земних надр. Геологічна освіта виконує велику роль у наданні знань про Землю. У Навчально-науковому інституті (ННІ) "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка діють сім кафедр геологічного спрямування: мінералогії, геохімії та петрографії; загальної та історичної геології; геології родовищ корисних копалин; гідрогеології та інженерної геології; геофізики; геоінформатики; геології нафти і газу. Викладачі цих підрозділів надають повний спектр необхідних предметів для отримання знань, що необхідні для дослідження надр Землі. Глобалізація світу і мережа "Інтернет" спричинили поширення інформації про міжнародні професійні асоціації та запросили бажаючих до їхніх лав. Це створило умови для заснування міжнародних осередків у нашій країні. Їх створення та розвиток здійснювалися повільно через відсутність досвіду й обмежену кількість англійськомовних учасників. Але долучення до програм було цікавим і корисним і давало можливості розвитку геологічної освіти в навчальних закладах України загалом і в ННІ "Інститут геології" зокрема. Посилене вивчення англійської мови студентами дало новий поштовх для розвитку осередків, який привів до участі й перемоги представників Київського університету в міжнародних заходах.

Створення та організація роботи. Досвід міжнародного співробітництва на кафедрі геофізики геологічного

факультету вже був. Раніше існувала асоціація між Європейською асоціацією геофізиків та інженерів (European Association of Geoscientists and Engineers – EAGE) і геологічним факультетом Київського університету (Geological Faculty Kiev University – GFKU), яку очолював її засновник – завідувач кафедри геофізики професор Георгій Продайвода, а посаду секретаря обіймав автор з 1996 по 2001 рр. Ця асоціація була представлена на конференції EAGE в Амстердамі (2001) разом із трьома іншими організаціями з України: Ukrainian Oil-and-Gas Academy (UNGA), Association of Ukrainian Geologists (AUG) та Ukrgeofizika. Також кафедра геофізики була асоційованим членом Асоціації дослідників свердловин (Асоціація исследователей скважин – АИС) з 1996 року (Вижва та ін., 2011).

За пропозицією геофізика з компанії "Shell" Майкла Бур'яника, який був членом Комітету з глобальних питань (GAC) та куратором України в SEG, 2 лютого 2002 р. було створено першу Київську студентську секцію – Геофізичне товариство Київського університету (Kyiv University Geophysical Society – KUGS), яку очолив автор як доцент кафедри геофізики (Гришук та Вижва, 2016). Михайло Бур'яник уперше зустрівся із членами студентського осередку у 2004 році. Він розповів про нові можливості SEG для розширення геофізичних знань та реалізації творчого потенціалу студентів.

У 2003 році секція отримала грант (2000 доларів США) від фонду товариства (SEG Foundation) на комп'ютерну техніку для студентських відділень. На ці кошти було придбано комп'ютер, сканер, цифровий фотоапарат та кольоровий лазерний принтер (Buriyuk et al., 2004). Це

обладнання допомогло в організації та звітності зборів осередку, створенні стендів кафедри геофізики та документуванні подій геологічного факультету.

Організація діяльності осередку базувалася на ентузіазмі її членів. Кожен з них робив свій внесок у його розвиток і реалізував свої таланти. Секція запрошувала нових членів та доповідачів, у 2006 році створила власний сайт українською та англійською мовами (<http://seg.univ.kiev.ua>), який підтримувався до 2018 року. Сайт містив інформацію про осередок SEG, його співпрацю, фонд SEG, членство, зустрічі, польові табори, публікації, статут секції, геофізичні практики, фотографії подій, враження про освіту за кордоном та

корисні посилання. Також було коротко висвітлено дані про студентські осередки AAPG (2007–2016) та EAGE (2010–2016). Інформацію про студентську секцію Київського університету у Вікіпедії SEG розміщено в 2017 р. (https://wiki.seg.org/wiki/Kyiv_University_Geophysical_Society). У цьому самому році створено групу SEG Kyiv Student Chapter у соціальній мережі Facebook (<https://www.facebook.com/segukraine2017>). Тут публікуються усі новини та запрошення. У 2019 році студенти створили новий сайт секції (<http://segkyiv.site/>). Він містить такі розділи, як "Осередок SEG", "Історія", "Діяльність", "Польові табори", "Семінар", "Галерея світлин" та "Контакти".



Член комітету з глобальних питань (GAC) Майкл Бур'яник разом із студентським осередком у геологічному музеї Київського університету імені Тараса Шевченка (27.09.2004)

Важливою частиною роботи осередку було щомісячне проведення зборів. За весь період існування секції її члени зробили понад 50 доповідей, також запрошувалися фахівці геологічної галузі та викладачі факультету. Серед доповідачів були геофізик компанії "Shell" Майкл Бур'яник (2004), сейсморозвідник компанії BP Павло Чолач (2005), представник Київського відділення EAGE (Local Chapter Kyiv) Дмитро Божежа (2007), декан геологічного факультету Сергій Вишва (2007), Представник AAPG в Україні Олександр Кічка (2007), професор, фахівець із геофізичних досліджень свердловин Валерій Курганський (2008), геолог Георгій Заїка-Новацький (2008, 2009), керівник місцевого осередку EAGE у Києві, завідувач кафедри геоінформатики, член-кореспондент НАН України Микола Якимчук (2010); доцент, фахівець із сейсморозвідки Павло Кузьменко (2010), факультетський радник осередку, доцент Павло Гришук (2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2015, 2016) та ін. Доповіді були присвячені геофізичній освіті, програмам міжнародних геологічних товариств, геологічній будові регіонів України, досвіду роботи за кордоном та участю у заходах міжнародних товариств тощо.

Завдяки програмі SEG Фреда і Кеті Хілтерман осередок отримував книги у друкованому та електронному форматі. Засновник секції Майк Бур'яник подарував кафедрі геофізики велику кількість англomовних геологічних книг у 2016 році. Це був значний внесок у розвиток геологічної освіти в ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Участь у міжнародних програмах SEG. Товариство геофізиків-розвідників надсидало інформаційні повідомлення, журнали Leading Edge та Geophysics. Осередок поступово став долучатися до міжнародних програм SEG. Скарбник секції взяв участь у студентських освітніх курсах (SEP) за підтримки ExxonMobil у 2007 році у м. Амстердам (*Chinsethagid*, 2009). За програмою SEG "Почесна лекція Європи" у 2008 р. осередком був запрошений ад'юнкт-професор Норвезького університету науки і техніки Пер Авсет.

Секція розвивала свою активність. Вона стала ініціатором участі команди Київського університету у конкурсі Американської асоціації геологів-нафтовиків (AAPG) "Імперська бочка" (Imperial Barrel Award – IBA) у Празі, яку з 2009 року і дотепер продовжує доцент кафедри геоінформатики Іван Віршило.

Осередок SEG поширював інформацію про міжнародні заходи, що збільшувало кількість учасників. Багато студентів геологічного факультету збагатили свої знання завдяки участі у SEP. Там вони дізналися про сучасний аналіз геофізичних даних, зустрілися з іноземними студентами та побачили різні міста. Зокрема, семеро осіб відвідали Санкт-Петербург (2010) (*Chinsethagid*, 2010), п'ятеро – Краків (2011), по одному – Катовіце (2016) та Анахайм (2018). Крім того, студенти брали участь в інших міжнародних геологічних заходах. Четверо студентів відвідали Міжнародну студентську конференцію геологів (International Geological Student Conference – IGSC) у м. Белград (2012) (*Vanic*, 2012), а одна особа

була на 8-й Міжнародній конференції з нафтових технологій (International Petroleum Technology Conference – IPTC) у м. Куала-Лумпур (2015).

Осередок підтримував ініціативи закордонних науковців щодо проведення навчальних курсів з геофізики. Дослідник із Політехнічного інституту Ренсселера Анахіта Тікку (США) провела короткі курси про гравітаційний та сейсмічний моніторинг завдяки програмі Фулбрайта (2008). Фахівець із компанії "Shell" Мартін Букхольт читав лекції із сейсмічних досліджень (2013–2017) на добровільній основі.

Завдяки лекторським програмам SEG на геологічному факультеті було проведено низку доповідей спеціалістів із різних куточків світу, серед яких геофізичний радник компанії "Odin Petroleum" (Берген) професор Пер Авсет (2008); сейсмічний аналітик, віце-президент італійського відділення SEG-EAGE (Трієст) та голова комітету SEG Альдо Веснавер (2010); старший геофізичний радник ION GX Technology (Лондон) Ян Джонс (2012); сейсмічний аналітик, консультант компанії "Contractor" (Х'юстон) Карл Регоне (2013); заступник декана М'юборнського коледжу Землі та енергетики, професор школи нафтової та геологічної інженерії (Норман) Карл Сондергелд (2013) та професор Тель-Авівського університету (Тель-Авів) Євген Ланда (2015). Доповіді висвітлювали питання дослідження колекторів і пасток методами сейсморозвідки і технології петрофізичних досліджень у лабораторії.

Співпраця з іншими товариствами. Студентський осередок SEG плідно співпрацював з AAPG та EAGE. Досвід міжнародного співробітництва дозволив стати активною командою у заходах, які були організовані Спілкою геологів України (СГУ), де виступили президенти AAPG Пітер Роуз (2005) та Пол Веймер (2012). У

2003 році на геологічному факультеті було створено студентську секцію AAPG, яку очолював її засновник – завідувач кафедри геології родовищ корисних копалин Володимир Михайлов. На цій кафедрі у 2005 році було створено молодіжну українську секцію міжнародної спілки економічних геологів (Society of Economic Geologists), куратором якої був доцент Олександр Грінченко (*Безродна та ін.*, 2020). Із 2005 року до гуртка SEG було передано керівництво осередком AAPG та його формуванням, а куратором був член AAPG Олександр Кічка.

Студентська секція SEG підтримала створення місцевого відділу EAGE Києва (2004), який заснував і очолював завідувач кафедри геоінформатики, професор, член-кореспондент НАН України Микола Якимчук. Завдяки цьому осередку на геологічному факультеті виступили фахівці з різних країн, зокрема президенти EAGE Гарет Вільямс (Сполучене Королівство, 2006) і Тео Кортекас (Нідерланди, 2007). Також зробили доповіді видатні лектори, такі як декан Стаффордширського університету, доктор Девід Робертс (Сполучене Королівство, 2013), геофізик компанії "Shell" Володимир Гречка (США, 2007) та ін. Доповіді були присвячені професійній кар'єрі в умовах майбутнього глобального енергетичного переходу; розвитку нових наукових напрямів і технологій та ролі AAPG; ролі професійного суспільства EAGE у створенні багатодисциплінарного майбутнього для вуглеводного видобутку; поточному стану геології, геофізики та їх перспективам для майбутніх фахівців; геологічному моделюванню на базі геологічної статистики; споживачам мінералів та їх важливості для сучасної економіки; застосуванню сейсмічної анізотропії в нафтогазовій промисловості; а також навчанню писати якісні геофізичні статті тощо.



Доктор Альдо Веснавер під час лекції у найбільшій аудиторії геологічного факультету (18.02.2010)

На основі секції SEG на геологічному факультеті 5 березня 2010 року було створено студентський осередок EAGE, який того самого року посів перше місце у геологічній вікторині (Geo-Quiz). Також його члени у 2011 році взяли участь у Балканському геофізичному конгресі у Белграді, де знов здобули перше місце в геологічній вікторині. Трьома осередками було складно керувати, тому

автор виступив з ініціативою з 2017 року керівництво над студентським осередком AAPG передати доценту кафедри геоінформатики Івану Віршило, а студентську секцію EAGE підпорядкувати зав. кафедри загальної та історичної геології проф. Олені Іванік.

Вихід Київського осередку SEG на світовий рівень. Секретарем осередку у 2012 році вперше було

взято участь у Симпозіумі студентських лідерів (SLS) (за підтримки компанії "Chevron") у м. Лас-Вегас. Отриманий досвід допоміг іншим студентам долучитися до цієї програми SEG і доповісти про здобутки нашої секції в таких містах США, як Новий Орлеан (2015), Даллас (2016), Х'юстон (2017), Анахайм (2018) та Сан-Антоніо (2019).

Радник факультету як викладач залучив до кафедри багато студентів, організував збори, фотографування та відвідування лекторів, написав дві статті для студентської зони у журнал "The Leading Edge" (2003, 2013), зробив презентацію на семінарі радників факультету на зборах SEG у Х'юстоні (2009), був учасником Міжнародної вітрини (SEG International Showcase) разом із проректором Київського університету Сергієм Виживою у Денвері (2010), доповів про студентський осередок Києва на зустрічі факультетських радників у Новому

Орлеані (2015) та розповів студентам про особливості кар'єри геофізика на зборах SEG у Сан-Антоніо (2019).

Намагання збільшити кількість балів за річний звіт спонукало осередок до спілкування зі школярами. Вперше студенти розповіли про Київську секцію SEG у Миколаївському муніципальному колегіумі та школі Тернополя у 2016 році. Скарбник осередку зробив презентацію діяльності Київського відділу SEG протягом 2017–2018 років на дистанційному семінарі Євразійського регіонального консультативного комітету у вересні 2018 року. Доповіді про секцію SEG та запрошення на її заходи було зроблено у січні 2020 року в Полтавському національному технічному університеті та Українському фізико-математичному лицейі Київського університету. У лютому 2020 року в гімназії №179 м. Києва відбулася презентація студентського відділення SEG.



Учасники семінару факультетських кураторів на зборах SEG у Новому Орлеані (18.10.2015)



Презентація осередку SEG в Українському фізико-математичному лицейі Київського університету (30.01.2020)

Організація геофізичних досліджень. Студентів завжди цікавили практичні можливості, такі як конкурси, подорожі, нове обладнання, польові дослідження, огляд зразків гірських порід тощо. Завдяки участі у міжнародних геофізичних заходах були налагоджені контакти між студентами різних осередків. У

січні 2016 року президент івано-франківської студентської секції SEG розповів про свій осередок, а наступного дня взяв участь у радіометричному та магнітному зніманні трубопроводів і енергомереж поблизу будівлі геологічного факультету, які вперше організували члени осередку SEG.

Завдяки участі у міжнародних польових дослідженнях студенти стали організовувати різні заходи. Вони почали висувати ідеї, планувати дії та втілювати їх у життя. Секція стала командою одностайців. Вона організувала перший в Україні польовий табір SEG наук про Землю (SEG Geoscience Field Camp) у Кам'янець-Подільському для археологічного вивчення фортифікаційних укріплень у 2017 році. Другий польовий табір у 2018 році був організований у Тернопільській області для вивчення структури гіпсової печери Вертеба, яка є музеєм трипільської культури (Petrokushyn, 2020). Третій польовий табір осередок організував у Західних Карпатах поблизу м. Ужгород для вивчення українських палеовулканів. Команди ознайомилися з такими геофізичними методами вивчення геологічної будови, як наземний проникаючий

радар, електрична томографія, магніторозвідування, поверхневе сейсмічне знімання, радіометрія, обстеження за допомогою безпілотного літального апарата (БПЛА) і системи глобального позиціонування (GPS). Колективна праця об'єднувала студентів і посилювала їхню взаємодію. Наприкінці робіт команди заслухали звіти про геофізичні результати за підсумками проведених польових досліджень в Україні. Польові табори SEG сприяли знайомству й обміну знаннями між студентами з різних університетів. Учасники дізналися про діяльність 17 студентських осередків SEG і перспективи наук про Землю. Усього в польових таборах в Україні взяли участь 49 студентів з 11 країн: Україна – 17, Польща – 7, Хорватія – 7, Румунія – 5, Угорщина – 4, Єгипет – 3, Латвія – 2, Пакистан – 1, Чехія – 1, Росія – 1 та Монголія – 1.



Проведення польових таборів в Україні було здійснено завдяки підтримці ННІ "Інститут геології" та інших організацій. Кафедра геофізики надала магнітометри, електророзвідувальну установку (2017, 2018) та радіометри (2019). Науковець Ксенія Бондар була інструктором з магнітних спостережень. Товариство з обмеженою відповідальністю "Transient Technologies" надало георадари (2017–2019). Геофізик Андрій Лобода з Державного підприємства "Київський інститут інженерних вишукувань і досліджень "Енергопроект" забезпечив сейсмічні дослідження (2017, 2019). Перед

учасниками таборів виступили з доповідями директор Інституту геології Володимир Михайлов (2017), доценти кафедри геофізики Павло Кузьменко (2017) та Павло Гришук (2017), директор ТОВ "Трансїєнт технолоджіс" Володимир Іващук (2017), старший науковий співробітник Ксенія Бондар (2017, 2018), завідувач кафедри геофізики Сергій Вижва (2018) та ін. Виступи були присвячені геологічній освіті, геофізичним дослідженням та геології України. Учасники польового табору ознайомилися із геологічним музеєм та лабораторією ядерної геофізики Інституту геології (2018).



Проведення електротомографії у печері Вертеба у другому польовому таборі SEG (22.08.2018)

Визнання та розвиток осередку. Напружена робота з виконання багатьох пунктів щорічного звіту 2017 року була захоплюючою та ефективною. Осередок набрав багато очок, оскільки студенти бачили можливості, отримували досвід і працювали разом для досягнення мети. Це зумовило визнання київського осередку SEG у 2018 році як найкращого серед інших у світі.

Успіх було досягнуто, коли студенти почали брати участь у програмах SEG та розвивати ініціативи. Члени розділу визнали, що, на відміну від лекцій, практичне навчання є більш цікавим та корисним для розуміння геофізичних технологій. Різні міжнародні заходи дозволили дізнатися більше про геофізику, знайти друзів і відкрити нові способи реалізації власного потенціалу.



Команда Київського університету з нагородою за кращий студентський осередок SEG 2018 року (31.10.2018)

Більше 101 студента Київського університету були членами осередку Товариства геофізиків-розвідників протягом двох десятиліть. Слід зазначити, що кількість членів секції SEG збільшувалася за активності її урядовців: 2002 (10), 2003 (11), 2004 (12), 2005 (12), 2006 (12), 2007 (11), 2008 (11), 2009 (10), 2010 (13), 2011 (11), 2012 (19), 2013 (11), 2014 (14), 2015 (15), 2016 (14), 2017 (16), 2018 (14), 2019 (14), 2020 (20) та 2021 (19). Студентське членство у SEG від безоплатного змінилося на 5 дол. США із 2018 року. Для порівняння, членство для студентів у EAGE становить 25 євро, і це стало перешкодою для його

розвитку. Активне членство SEG коштує \$ 16 для фахівців з України. Спочатку студентський геофізичний осередок Київського університету мав базовий рівень (Base Level), а після першого відвідування симпозиуму студентських лідерів (2012) перейшов на середній статус (Ridge). І тільки проведення першого та другого польових таборів (2017 та 2018) дозволило досягнути найвищого рівня (Summit). Зараз Київська геофізична секція посідає місце серед восьми кращих із понад 120 осередків SEG світу (<https://seg.org/Education/Student-Early-Career/Student-Chapters/Student-Chapter-Excellence-Program>).



Студентське членство в осередку SEG обмежується роками навчання в університеті. Зазвичай запрошували студентів із другого курсу. Аспіранти залишалися у секції SEG довше. Активність студентів в осередку впливала на їхні посади. Куратор, президент, віце-президент, секретар та скарбник обиралися закритим голосуванням відповідно до статуту осередку SEG. Із січня 2018 року куратор факультету перестав працювати у Київському університеті, що обмежило можливість спілкування зі студентами. Тому з 2019 року факультетським радником став аспірант Анатолій Чернов, а колишнього куратора було визнано почесним. Із 2021 року осередок очолив доцент кафедри геофізики Олександр Шабатура, а співрадником став Роман Петрокушин.

Студентський осередок продовжував розширювати свою діяльність. Він отримав кошти (Outreach grant) у 2020 році, щоб провести перший семінар наук про Землю SEG в Україні (SEG Geoscience Workshop). Подія відбулася 18 лютого 2020 року у Києві. Організатори заходу запросили п'ять компаній, які працюють у різних сферах геологічних та геофізичних рішень, а саме: нафтогазові послуги (Schlumberger, Weatherford), енергетика (ДТЕК), наукові дослідження в Антарктиді тощо. Представники трьох студентських осередків (EAGE, SPE та AAPG) доповіли про можливості своїх товариств для студентів. Загалом у семінарі було зареєстровано близько 150 учасників, у тому числі з п'яти університетів України, а також Польщі, Великої Британії та Румунії.

Посадовці Київського студентського осередку SEG (2002–2021)

Постійний Київський студентський осередок СЕС (2002-2021)					
Рік	Куратор	Президент	Віце-президент	Секретар	Скарбник
2002	Павло Гришук	Андрій Тищенко	-	Марія Решетник	Вікторія Скорик
2003					
2004					
2005			Олег Маковець	Марина Заманська	
2006					
2007		Олег Маковець	Дмитро Сергєєв	Олег Чалий	Євген Устенко
2008		Євген Устенко	Олег Чалий	Юлія Кулинич	Сергій Шаврін
2009			Сергій Шаврін	Юлія Кулинич	
2010					
2011		Сергій Шаврін	Тетяна Кошлякова	Анастасія Єрофєєва	
2012			Наталія Тройнич	Тетяна Ільченко	
2013		Тетяна Ільченко	Віталій Бриков	Дмитро Пилипенко	
2014		Сергій Шаврін	Анатолій Кострець	Анатолій Чернов	Віталій Бриков
2015 ¹		Анатолій Чернов	Олег Лошаков	Наталія Русаченко	Олена Рибнікова
2016			Олена Рибнікова		Ліана Подоляко
2017			Олег Лошаков	Олена Краснікова	Олег Петрокушин
2018				Наталія Русаченко	
2019 ²	Анатолій Чернов	Олег Петрокушин	Роман Петрокушин	Артем Корнієнко	Марія Тарасюк
2020		Артем Корнієнко	Марія Тарасюк	Анастасія Грищенко	Юлія Білоусова
2021 ³	Олександр Шабатура	Марія Тарасюк	Анастасія Грищенко	Олег Булах	Марія Яковенко

1 – Євген Устенко (почесний член осередку); 2 – Павло Гришук (почесний радник); 3 – Роман Петрокушин (співрадник)



Перший семінар SEG наук про Землю в Україні (18.02.2020)

Осередок розробив ініціативу щодо організації польових днів (Field Days). Захід було проведено на горі Тотоха в селі Медвин Київської області із 30 до 31 липня 2020 року. Основною метою було продемонструвати студентам-

першокурсникам застосування геофізичної апаратури для археологічних досліджень кургану. Учасники працювали з магнітометрами, радіометрами та БПЛА.



Польові дні Київського осередку SEG для вивчення кургану Тотоха (31.07.2020)

Члени секції взяли участь у програмі SEG EVOLVE у 2020 році, де отримали три нагороди: "Краща інвестиція", "Співпраця на відстані" та "Співпраця зі зниженням витрат".

Висновки. Протягом двох десятиліть діяльності київський студентський осередок SEG досяг багатьох здобутків. Системна робота та спільні зусилля зумовили високі результати. Завдяки програмам SEG секція отримувала фінансову підтримку, що дало змогу придбати комп'ютерне обладнання, провести різні заходи, організувати три польові табори, взяти участь у чотирьох освітніх програмах та п'яти семінарах студентських лідерів, запросити шість почесних лекторів, отримати кілька

стипендій та геофізичну літературу. Крім того, семеро професіоналів виступили на засіданнях секції, було проведено два місцеві польові дослідження, а також зроблено понад п'ятдесят доповідей щодо їхньої участі у різних геофізичних подіях.

Більше сотні студентів Київського університету були членами осередку за останні два десятиліття. Багато учасників секції успішно продовжили свою кар'єру у міжнародних та українських компаніях, таких як "Schlumberger", "Weatherford", "Ukrasvydobuvannya", Національний Антарктичний науковий центр України та ін.

Участь студентського осередку Київського національного університету імені Тараса Шевченка у програмах та ініціативах SEG

№	Програма SEG чи ініціатива*	Рік	Вартість, \$
1.	The Leading Edge & Geophysics journals	2002-2021	н/д
2.	Foundation through PCs	2003	2000
3.	Fred and Kathi Hilterman Student Chapter Book Program	2005-2021	1600
4.	Student educational program (SEP)	2007, 2010, 2011, 2016, 2018	н/д
5.	Honorary Lecture (HL)	2008, 2010 (2), 2012, 2013 (2), 2015	н/д
6.	Faculty Advisors' Workshops*	2009, 2010, 2015	н/д
7.	Student Leadership Symposium (SLS)	2012, 2015, 2017, 2018, 2019	н/д
8.	Outreach Grant	2015, 2020	1800, н/д
9.	Geoscience Field Camp	2017, 2018, 2019	3200, 5000, н/д
10.	Scholarship	2017	2000
11.	Best SEG student chapter	2018	5000
12.	EVOLVE	2020	н/д
Загалом			20600

Ініціативи київського студентського осередку SEG та його друзів*

№	Ініціатива	Рік
1.	Конкурс з визначення гірських порід	2015
2.	Зимове геофізичне знімання	2016
3.	Презентації про київський осередок SEG	2016, 2017, 2020 (3)
4.	Геологічні книги від Майкла Бур'яника*	2016
5.	Геологічна вікторина (GeoQuiz)	2018
6.	Семінар наук про Землю SEG (Outreach Grant)	2020
7.	Польові дні	2020

Подяка. Студентська секція Київського національного університету імені Тараса Шевченка вдячна Товариству геофізиків-розвідників за його підтримку. Автор особисто дякує керівництву ННІ "Інститут геології" за сприяння діяльності міжнародних осередків наук про Землю, завдяки чому українські студенти мали змогу більше дізнатися про геофізику, знайти друзів в інших країнах та фахово розвиватися.

Список використаних джерел

- Безродна, І.М., Михайлов, В.А., Андреева, О.О., Соловйова, О.З. (2020). Розвиток геологічної науки в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка (2005–2019). Довідник. К.: ВПЦ "Київський університет".
- Вижва, С.А., Гришук, П.І., Зінченко, О.В., Киселевич, Л.С., Кошляков, О.Є., Кравченко, Д.В., Михайлов, В.А., Нестеровський, В.А., Павлишин, В.І., Рева, М.В., Толстой, М.І., Шостак, А.В. (2011). Геологія в Київському університеті. К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".
- Гришук, П.І., Вижва, С.А. (2016). Випускники геологічного факультету Київського університету: довідникове видання. К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".
- Buriyanyk, M., Sen, M., Gryshchuk, P., Tyschenko, A., Gomes, C., Rodrigues, I., Lopes, I., Leitão, Z. (2004). Globalization 101. *The Leading Edge*, 23(3), 260–266. <https://doi.org/10.1190/tle23030260.1>.
- Chinsethagid, C. (2009). Student Education Program Promotes Subsurface Integration Globally. *The Leading Edge*, 28(8), 892–894. <https://doi.org/10.1190/tle28080892.1>.
- Chinsethagid, C. (2010). Student Education Program supports career choices: *The Leading Edge*, 29(9), 1012. <https://doi.org/10.1190/tle29091012.1>.
- Gryshchuk, P. (2013). Student Zone: Kyiv University Geophysical Society. *The Leading Edge*, 32(2), 224–225. <https://doi.org/10.1190/tle32020224.1>.

- Petrokushyn, R. (2020). Student Zone: SEG field camps motivate future geophysicists. *The Leading Edge*, 39 (5). <https://doi.org/10.1190/tle39050360.1>
- Vanic, M. (2012). Student Zone: Serbian Student Chapters working together: The 3rd International Geosciences Student Conference in Belgrade, Serbia. *The Leading Edge*, 31(9), 1100–1102. <https://doi.org/10.1190/tle31091100.1>.

References

- Bezrodna, I.M., Mykhailov, V.A., Andreieva, O.O., Soloviova, O.Z. (2020). The development of geological science at the Taras Shevchenko National University of Kyiv (2005–2019). Kyiv: Kyiv University publishing center. [in Ukrainian]
- Buriyanyk, M., Sen, M., Gryshchuk, P., Tyschenko, A., Gomes, C., Rodrigues, I., Lopes, I., Leitão, Z. (2004). Globalization 101. *The Leading Edge*, 23(3), 260–266. <https://doi.org/10.1190/tle23030260.1>.
- Chinsethagid, C. (2009). Student Education Program Promotes Subsurface Integration Globally. *The Leading Edge*, 28(8), 892–894. <https://doi.org/10.1190/tle28080892.1>.
- Chinsethagid, C. (2010). Student Education Program supports career choices: *The Leading Edge*, 29(9), 1012. <https://doi.org/10.1190/tle29091012.1>.
- Gryshchuk, P.I., Vyzhva, S.A. (2016). Graduates of Geological Faculty at the University of Kyiv. Kyiv: Kyiv University publishing center. [in Ukrainian]
- Gryshchuk, P. (2013). Student Zone: Kyiv University Geophysical Society. *The Leading Edge*, 32(2), 224–225. <https://doi.org/10.1190/tle32020224.1>.
- Petrokushyn, R. (2020). Student Zone: SEG field camps motivate future geophysicists. *The Leading Edge*, 39 (5). <https://doi.org/10.1190/tle39050360.1>
- Vanic, M. (2012). Student Zone: Serbian Student Chapters working together: The 3rd International Geosciences Student Conference in Belgrade, Serbia. *The Leading Edge*, 31(9), 1100–1102. <https://doi.org/10.1190/tle31091100.1>.
- Vyzhva, S.A., Gryshchuk, P.I., Zinchenko, O.V., Kyselevych, L.S., Koshliakov, O.Yev., Kravchenko, D.V., Nesterovskiy, V.A., Pavlyshyn, V.I., Reva, M.V., Tolstoy, M.I., Shostak, A.V. (2011). Geology at the University of Kyiv. Kyiv: Kyiv University publishing center. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 14.12.21

P. Gryshchuk, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: pgryshchuk@gmail.com,
Member of the Society of Exploration Geophysicists

20TH ANNIVERSARY OF THE STUDENT CHAPTER OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS AT KYIV UNIVERSITY!

Geological education is the basis for training specialists in the study of natural resources. The rational use of subsoil is the basis of the economic development of Ukraine, especially in the conditions of the energy transition. Educational institutions provide a wide range of disciplines for the geological training of students. Participation in international societies contributes to getting additional knowledge. The distribution of professional societies within institutions and enterprises is world practice in many countries. There are several geological associations that cooperate with Ukraine in the geologic sciences. The student section of the Society of Exploration Geophysicists (SEG) was established at Taras Shevchenko National University of Kyiv at the Department of Geophysics twenty years ago. The introduction to new features was interesting and useful for students and teachers. Thanks to SEG programs, students received new computer equipment, geophysical literature, educational courses, attendance of lectures, international participation in symposia, possibility of organizing field camps, getting of scholarships, etc. The field of activity of the SEG Kyiv student chapter covers reports on its work at international conferences and educational institutions, the invitation of specialists of the geological industry, participation in geological quizzes and competitions among foreign students, conducting geophysical studies, etc. Members of the SEG section organized international geoscience investigations in various regions of Ukraine. The geophysical surveys were conducted to study ancient buildings in Kamianets-Podilskyi, a gypsum Verteba cave and paleovolcanoes near Uzhgorod. 49 students from 11 countries participated in the field camps. Local studies of pipelines were carried out by geophysical methods near the building of the ESI "Institute of Geology" (Kyiv) and on Totoha Mount, located in Kyiv region. Students performed magnetics, electrical resistivity tomography (ERT), surface seismic exploration, ground-penetrating radar (GPR), geodesic measurements and surveys UAV. The student chapter activity was presented at its meetings, with more than 50 reports. For 20 years, more than 100 students were members of the SEG section, which has been the basis for the AAPG and EAGE faculty circles. The SEG Kyiv student chapter is recognized as the best one in 2018. The geophysical section SEG has made a significant contribution to the spread of geological knowledge and the presentation of Taras Shevchenko National University of Kyiv internationally.

Keywords: Society of Exploration Geophysicists, advisor, student chapter, geological faculty, honorary lecturers, geological education, Kyiv University, Institute of Geology, geophysical section, grant, award, SEG, EAPE, AAPG.

Наукове видання



ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 2(97)

**Комп'ютерна обробка статей О. Козіонова
Computer processing of the articles by O. Kozionova**

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"

Opinions, statements, accuracy of the quotations, economic and statistical data, terminology, proper names and other information are made on the responsibility of the authors. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit the submitted materials.

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, відповідної галузевої термінології, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали.



Формат 60x84^{1/8}. Ум. друк. арк. 12,32. Наклад 300. Зам. № 222-10447.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл2.
Підписано до друку 30.06.22

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 72; тел./факс (38044) 239 31 28
E-mail: vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
http: vpc.knu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02