

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричній базі даних Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib та Google Scholar.

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

Journal is indexed in Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib and Google Scholar.

Приведены результаты геологических, стратиграфических, палеонтологических, гидрогеологических, геофизических и геоинформационных исследований.

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

Издание индексируется в наукометрической базе данных Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib и Google Scholar.

Відповідальний за випуск О.І. Меньшов

**ВІДПОВІДАЛЬНИЙ РЕДАКТОР****РЕДАКЦІЙНА  
КОЛЕГІЯ****В.А. Михайлов, д-р геол. наук, проф.**

І. М. Безродна, канд. геол. наук, ст. наук. співроб. (заст. відп. ред.); О. І. Меньшов, канд. геол. наук (відп. секр.); В. Г. Бахмутов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; С. А. Вижва, д-р геол. наук, проф.; З. О. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; В. М. Гулій, д-р геол. наук, проф.; О. В. Дубина, д-р геол. наук, В. М. Загнітко, д-р геол.-мінерал. наук, проф.; В. І. Зацерковний, д-р техн. наук, доц.; О. М. Іванік, д-р геол. наук, проф.; О. М. Карпенко, д-р геол. наук, проф.; М. М. Коржнев, д-р геол.-мінерал. наук, проф.; І. М. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук., ст. наук. співроб.; О. Є. Кошляков, д-р геол. наук, проф.; В. М. Курганський, д-р геол.-мінерал. наук, проф.; В. Г. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук., ст. наук. співроб.; Б. П. Маслов, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О. Ю. Митропольський, чл.-кор. НАН України, д-р геол.-мінерал. наук, проф.; О. В. Митрохин, д-р геол. наук, проф.; П. О. Міненко, д-р фіз.-мат. 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, доц.; В. В. Шевчук, д-р геол.-мінерал. 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:**

М. Бур'яник, Шелл Глобал Солюшн Інтернешнл, Нідерланди; Л. Верник, Нафтова корпорація Маратон, США; А. Веснавер, Італійський національний інститут океанографії та прикладної геофізики, Італія; К. Зенг, Китайський геологічний університет, Китай; М. Короновський, Московський державний університет імені М. В. Ломоносова, Росія; Д. Ленц, Університет Нью-Брансвік, Канада; К. Лі, Китайський геологічний університет, Китай; М. Олівія, Лісабонський університет, Португалія; П. Перейра, Університет Миколаша Ромеріса, Литва; В. Портнов, Карагандинський державний технічний університет, Казахстан; Д. Робертс, Стаффордширський університет, Велика Британія; С. Спассов, Геофізичний центр Доурбес, Бельгія; М. Феді, Неапольський університет ім. Федеріко II, Італія; О. Ханчук, Далекосхідний геологічний інститут, Росія

Адреса редколегії

03022, Київ-22, вул. Васильківська, 90, ННІ "Інститут геології",  
☎ 380442597030, електронна адреса: geolvisnyk@ukr.net;  
<http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua/>.

Затверджено

Вченою радою ННІ "Інститут геології"  
14.12.17 року (протокол № 6)

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 № 16181-4653Р від 25.12.09

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

01601, Київ-601, 6-р Т.Шевченка, 14, кімн. 43  
☎ (38044) 239 31 72, 239 32 22; 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 ResearchBib and Google Scholar.

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в науковометричній базі даних Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib та Google Scholar.

Приведены результаты геологических, стратиграфических, палеонтологических, гидрогеологических, геофизических и геоинформационных исследований.

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

Издание индексируется в наукометрической базе данных Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib и Google Scholar.

Chief publication manager O. Menshov

Formatting and adjustment by O. Kozionova

**EXECUTIVE EDITOR****EDITORIAL BOARD**

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

**Ukrainian Members:**

I. Bezrodna, Cand. Sci. (Geol.), Senior Researcher (Deputy Executive Editor); O. Menshov, Cand. Sci. (Geol.), (Executive Secretary); V. Bakhmutov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher; S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; Z. Vyzhva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; V. Guliy, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Dubyna, Dr. Sci. (Geol.); V. Zagnitko, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; V. Zacerkovniy, Dr. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.; O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Karpenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; M. Korzhnev, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; I. Korchagin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; V. Kurganskiy, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; V. Lozitsky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; B. Maslov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; O. Mytropolskiy, Corr. NAS Ukraine, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; O. Mytrokhin, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; P. Minenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), 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.), Assoc. Prof.; 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:**

M. Burianyk, Shell Global Solutions International, The Netherlands; L. Vernik, Marathon Oil Company, USA; A. Vesnaver, Italian National Institute of Oceanography and Applied Geophysics, Italy; Q. Zeng, China University of Geosciences, China; M. Koronovskiy, Lomonosov Moscow State University, Russia; D. Lentz, University of New Brunswick, Canada; 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; D. Roberts, Staffordshire University, Great Britain; S. Spassov, Geophysical Center of Dourbes, Belgium; M. Fedi, University of Naples Federoco II, Italy; O. Khanchuk, Far East Geological Institute, Russia.

**Address**

Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine,  
tel. +380442597030, e-mail: geolvisnyk@ukr.net;  
<http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua/>

**Approved by the**

Academic Council of the Institute of Geology  
December 14, 2017 (Minutes # 6)

**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 # 16181-4653P issued on 25.12.2009

**Founded and published by**

Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
Kyiv University Publishing  
State Certificate # 1103 issued on 31.10.2002

**Address:**

Office 43, 14 Shevchenka Blvd, Kyiv, 01601  
☎ (38044) 239 31 72, 239 32 22; Fax 239 31 28

---

## ЗМІСТ

---

### МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

<b>Гулій В., Кріль С., Загнітко В., Степанов В., Куземко Я., Білик Н.</b> Кальклітати Кросненської зони Східних Карпат (Україна) .....	6
---	---

### ГЕОФІЗИКА

<b>Вижва С., Михайлов В., Онищук І.</b> Петрофізичні особливості порід Майкопської серії Кримсько-Чорноморського регіону .....	12
<b>Орлюк М., Марченко А., Бакаржієва М.</b> 3D магнітна модель земної кори Східно-Європейського кратону з урахуванням сферичності Землі та її тектонічна інтерпретація .....	21
<b>Кулієв Г.</b> Про особливості розповсюдження пружних хвиль в ізотропних середовищах за високих і надвисоких тисків .....	27
<b>Меньшов О., Сухорада А.</b> Основи теорії та методології геофізики ґрунтового покриву: перші результати практичного застосування.....	35
<b>Ширков Б., Бурахович Т.</b> Електромагнітні методи при прогнозуванні рудопроявів корисних копалин.....	40

### ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

<b>Кекелія С., Кекелія М., Попхадзе Н., Гагнідзе Н.</b> Вулканогенні родовища кольорових металів палеоостроводужних споруд і проблеми генезису руд (на прикладі рудних об'єктів Грузії, Вірменії та Туреччини).....	46
<b>Тіхлівець С., Філенко В.</b> Мінералогія натрієвих метасоматитів Первомайського родовища та їхній вплив на якість залізорудного концентрату .....	53
<b>Ішков В., Козій Є.</b> Про розподіл токсичних і потенційно токсичних елементів у вугіллі С <sub>7</sub> Ншахти "Павлоградська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району.....	58

### ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

<b>Кошляков О., Диняк О., Кошлякова І.</b> Проблеми виділення підземних водних масивів у межах транскордонних територій України з урахуванням вимог водного законодавства ЄС.....	67
---	----

### ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

<b>Зацерковний В., Тішаєв І.</b> Аналіз підходів щодо моніторингу "островів тепла" .....	71
<b>Тютюнник Ю., Шабатура О., Дауніс-і-Естадел'я Х.</b> Геостатистичне вивчення латерального і радіального розподілу концентрацій хімічних елементів у ґрунтовому покриві зони помірного техногенезу (на прикладі субурбії Київського мегаполісу).....	79
<b>Долинський І.</b> Геоінформаційний експертно-моделюючий комплекс дослідження регіональних моделей у геології.....	86

---

## CONTENTS

---

### MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

<b>Guliy V., Kril S., Zagnitko V., Stepanov V., Kuzemko Ya., Bilyk N.</b> Calcilithites of the Krosno zone in the East Carpathians (Ukraine) .....	6
---	---

### GEOFYSICS

<b>Vyzhva S., Mykhailov V., Onischuk I.</b> Petrophysical features of Maikop series of the Crimean-Black sea region .....	12
<b>Orlyuk M., Marchenko A., Bakarjieva M.</b> 3D magnetic model of the earth crust of the Eastern European craton with the account of the Earth sphericity and its tectonic interpretation .....	21
<b>Guliyev H.</b> The features of the propagation of elastic waves in isotropic media at high and ultra-high pressures .....	27
<b>Menshov O., Sukhorada A.</b> Basic theory and methodology of soil geophysics: the first results of application .....	35
<b>Shyrkov B., Burakhovych T.</b> Electromagnetic methods for forecasting of mineral resources occurrences .....	40

### MINERAL RESOURCES

<b>Kekelia S., Kekelia M., Popkhadze N., Gagnidze N.</b> The volcanogenic deposits of non-ferrous metals of paleoisland arc environment associated with wall rock alterations of host rocks and problems of ore genesis (on the example of ore districts in Georgia, Armenia and Turkey) .....	46
<b>Tikhliivets S., Filenko V.</b> Mineralogy of sodium metasomatites of the Pervomayske deposit and their influence on quality of iron ore concentrate .....	53
<b>Ishkov V., Koziy E.</b> Distribution of toxic and potentially toxic elements in the coal of the layer c <sub>7</sub> <sup>H</sup> of the "Pavlogradska" mine of Pavlogradsko-Petropavlovskiy geological and industrial district .....	58

### HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

<b>Koshliakov O., Dyniak O., Koshliakova I.</b> Problems of determination of groundwater body at cross-border regions of Ukraine according to EU water legislation .....	67
--	----

### GEOLOGICAL INFORMATICS

<b>Zatserkovnyi V., Tishaiev I.</b> Analysis of "heat islands" monitoring principles .....	71
<b>Tyutyunnik Yu., Shabatura O., Daunis-i-Estadella J.</b> Geostatistical study of lateral and radial distribution of concentrations of chemical elements in the soil of moderate technogenesis zone (on example of Kyiv suburbia) .....	79
<b>Dolynskiy I.</b> Geoinformation expert-modeling complex of research of regional models in geology .....	86

---

## СОДЕРЖАНИЕ

---

### МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

<b>Гулий В., Криль С., Загнитко В., Степанов В., Куземко Я., Билык Н.</b> Кальклититы Кросненской зоны Восточных Карпат (Украина).....	6
---	---

### ГЕОФИЗИКА

<b>Выжва С., Михайлов В., Онищук И.</b> Петрофизические особенности пород Майкопской серии Крымско-Черноморского региона.....	12
<b>Орлюк М., Марченко А., Бакаржиева М.</b> 3D магнитная модель земной коры Восточно-Европейского кратона с учетом сферичности Земли и ее тектоническая интерпретация .....	21
<b>Кулиев Г.</b> Об особенностях распространения упругих волн в изотропных средах при высоких и сверхвысоких давлениях .....	27
<b>Меньшов А., Сухорада А.</b> Основы теории и методологии геофизики почвенного покрова: первые результаты практического применения .....	35
<b>Ширков Б., Бухарович Т.</b> Электромагнитные методы при прогнозировании рудопроявлений полезных ископаемых.....	40

### ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

<b>Кекелия С., Кекелия М., Попхадзе Н., Гагнидзе Н.</b> Вулканогенные месторождения цветных металлов палеоостроводужных сооружений и проблемы генезиса руд (на примере рудных объектов Грузии, Армении и Турции) .....	46
<b>Тихливец С., Филенко В.</b> Минералогия натриевых метасоматитов Первомайского месторождения и их влияние на качество железорудного концентрата .....	53
<b>Ишков В., Козий Е.</b> О распределении токсичных и потенциально токсичных элементов в угле пласта с <sub>7</sub> <sup>н</sup> шахты "Павлоградская" Павлоградско-Петропавловского геолого-промышленного района .....	58

### ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

<b>Кошляков А., Диняк О., Кошлякова И.</b> Проблемы выделения подземных водных массивов в пределах трансграничных территорий Украины с учетом требований водного законодательства ЕС .....	67
--	----

### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

<b>Зацерковный В., Тишаев И.</b> Анализ подходов к мониторингу "островов тепла".....	71
<b>Тютюнник Ю., Шабатура А., Даунис-и-Естаделья Х.</b> Геостатистическое изучение латерального и радиального распределения концентраций химических элементов в почвенном покрове зон умеренного техногенеза (на примере субурбии Киевского мегаполиса).....	79
<b>Долинский И.</b> Геоинформационный экспертно-моделирующий комплекс исследования региональных моделей в геологии.....	86

V. Guliy<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.  
E-mail: vgul@ukr.net,  
S. Kril<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol.), Engineer  
E-mail: solia\_kr@ukr.net,  
V. Zagnitko<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,  
V. Stepanov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. prof.,  
Ya. Kuzemko<sup>3</sup>, Geologist,  
N. Bilyk<sup>1</sup>, Prof. assist.  
<sup>1</sup>Ivan Franko National University of Lviv  
Geology Faculty, 4, Hryshovsky Str., Lviv, 79005, Ukraine,  
<sup>2</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
Institute of Geology, 90, Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine,  
<sup>3</sup>PAO "Interbudtunnel", 1, Promyslova Str., Kyiv, 01013, Ukraine

### CALCLITHITES OF THE KROSNO ZONE IN THE EAST CARPATHIANS (UKRAINE)

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

*Results of carbonates distribution in the flysch rocks of the Krosno Zone (Ukrainian Carpathians), which are composed mainly by interstratification of sandstones, argillites and aleurolites, and sporadically limestones, dolostones and marls as well as estimations of contents are analysed in this article. Carbonates are widely distributed in variable amounts in the rocks outcropped into the new Beskyd tunnel at the Carpathians watershed and surrounding area. Most high values of carbonates (up to 77,11 wt. %) as well as its lowest contents (a few per cent) were found in different sectors. According to X-ray powder diffraction observations on whole-rock samples carbonates are represented by calcite and dolomite. Dolomite is dominant phase and its total amount is about three times more than calcite.*

*Two main different age morphological and mineralogical generations of carbonates are distinguished within the flysch rocks after petrographic studies and microbeam analyses. Early generation of the carbonates is represented by coarse grained detrital dolomite and finer calcite as cement. Late generation of big in size crystals of carbonates is main component of the carbonate, carbonate-quartz, and carbonate-sulphide druses and veins, which are distributed locally. Studied carbonate-bearing rocks are regarded as calclithites after the Folk's classification due to significant amounts of terrigenous carbonates. Carbonates from the initial flysch rocks have  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values similar to those of the typical marine limestone carbonates and are limited in a relatively narrow field. It is additional evidence of local sources for the flysch formations rich in carbonates.*

**Keywords:** calclithites, flysch, Krosno zone, sandstones, carbonates, C and O isotopes.

**Introduction.** Carbonates are widespread in variable amounts in the flysch rocks of the Ukrainian Carpathians, which are composed mainly by interstratification of sandstones, argillites and aleurolites, and sporadically limestones, dolostones and marls. The above-mentioned rocks in different proportions are typical for all regional units of the studied territory [1, 4, 6, 7] and surrounding parts of the Carpathians [11, 14].

Most of these rocks are represented by terrigenous components – quartz, plagioclase, carbonates, mica, chlorite, zircon, titanite, tourmaline, rutile, etc. Two main different age, morphological and mineralogical generations of carbonates were distinguished within the flysch rocks. Earlier generations of the carbonates are represented by coarse grained detrital fragments and finer carbonate as cement [5]. Total contents of carbonates in the sandstones and shales are fluctuating from parts of tenth percent up to dozens percents [1, 6, 7], and commonly regarded as cement of terrigenous rock varieties.

In commonly used classifications of clastic rocks by mineral composition, scientists consider three components: quartz, feldspar and other terrigenous material [20]. Special group of terrigenous rocks that mainly consists of eroded limestones and other carbonate rocks fragments was for the first time systematically described by R. L. Folk in 1959 [12] and defined as calclithite. He studied composition of the sedimentary rocks and identified species with a predominance of silt-sand-gravel carbonate fraction more than 50 per cent in the composition of terrigenous material. The grain size of these rocks could range from siltstones (rare) to sandstones (fairly common) and to conglomerate (most common). The rocks often are product of intense orogeny early phases and, particularly in its early phases before the sedimentary cover has been stripped off the source area. Their formation is possible in case of intensive erosion and short detritus transport distance [12, 13]. Absence of uniform classification of terrigenous rocks

complicates analysis of rocks with a high content of carbonates and leads to disparate treatment of geological terms. That's why, calclithite should be considered as distinct terrigenous rocks and form a terrigenous rocks group equivalent to the orthoquartzite, arkose, or greywacke. Thus the triangle composition for sandstones should be expanded to a tetrahedron and include terrigenous carbonate rocks [9, 12, 13].

Calclithites were discovered and described in different age formations and numerous regions (the Miocene Oakville Formation of the Central Texas [15], the Permian Phosphoria Formation in the Idaho [19], the Palaeogene Formation of the Tajo Basin, Spain [10], rocks of the Laramide basement uplifts of the Rocky Mountain foreland (Late Cretaceous-Late Eocene) [17], Upper Miocene arenites of the central Apennines, Italy [18]). These are evidence of permanent presence of calclithites among other terrigenous rocks.

In this article we described calclithites from the Krosno zone, which are developed in the new Beskyd tunnel and surrounding areas, and tried to give information on their origin.

**Geological settings.** Due to construction of the new Beskyd tunnel at the Carpathians watershed there was a direct access to the artificial outcrops and geological study with sampling of materials from flysch formation rocks of the Krosno Zone which changed minimally. Beside the tunnel, similar clastic rocks with a high content of carbonates were found in different sectors of the Krosno Zone near Skotarske, Guklyvuy, Volovets villages, etc.

Krosno (or Silesian) Zone is located in the central part of the Outer Carpathians [11, 14]. General structure of this zone is similar to other Outer Carpathians nappes. Its internal subzones were thrust onto the outer ones in north-east direction, as well as other main Ukrainian Carpathians units. Geological boundaries and structural features of this zone differ on various tectonic schemes of the Ukrainian Carpathians [3, 14].

The flysch series is composed of interstratification of light gray massive sandstones (up to 90 % of the cross section), and dark to black argillites and aleurolites, sporadically limestones, dolostones and marls. They are regarded [1–3, 11] as a part of the Oligocene Lower Krosno Formation. General dipping of the Krosno Formation stratum in limits of the tunnel is south-western, under varying angles from 30° up to 60°. In some places there are flexures and orthogonal or (rarely) perpendicular fractures in the rocks which are often filled with late veins and druses (thickness up to 50 centimeters) of the newly formed minerals.

Calcite druses and veins dominate; they contain small crystals of quartz, which has all the features of the Maramures "diamonds" [5]. Hydrocarbons seeps (yellow-green in color) on surfaces of the late druse in flysch rocks were found in the new Beskyd tunnel. In these places quartz contains a large number of liquid and solid hydrocarbons inclusions.

**Sampling and analytical techniques.** Beside routine geological investigation and sampling petrographic studying of thin sections were carried out to determine of crystallization ordering for minerals of carbonate-bearing rocks, which are typical for the Krosno Zone, as well as to check shapes and heterogeneity of individual minerals of these rocks.

To estimate total amount of carbonates in the rocks we used its solution by hydrochloric acid of different concentrations (5 % and 10 %) and temperature (with heating or without it). Weight method was involved for resulting calculation. Carbonate compositions were determined on whole-rock samples using a DRON powder diffractometer.

Taking into consideration the results from thin sections observations, microbeam analyses of mineral grains were carried out using a REMMA-10202 scanning electron microscope equipped with an energy-dispersive detector "EDAR" (Lab of the Faculty of Physics, National University of Lviv, named after Ivan Franko) on the previously cleaning and prepared samples by carbon fine film decoration. Set of

the carbonate grains were used to determine its shape and size, inner heterogeneity and coexisting phases. Analyses included general investigations of chemical composition of separate phases.

The oxygen and carbon isotopic compositions in the whole-rock carbonates were analyzed in the Institute of the Geochemistry and Ore Formation, Kyiv. Carbon dioxide was released from carbonates using the  $\text{PbCl}_2$  under 500 °C. The relative difference in oxygen and carbon isotope ratios in  $\text{CO}_2(\text{gas})$  was measured on a MI-1201MV mass spectrometer. The laboratory  $\text{CO}_2$  was used as standard GIN-1 during isotopic measurement, which is connected to the International PDB and SMOW standards respectively. The accuracy of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  measurement in whole-rock samples was  $\pm 0,1 \text{ ‰}$  and  $\pm 0,2 \text{ ‰}$  respectively. The Craig correction was taken into consideration for the determination of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{samp}}$  (PDB) and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{samp}}$  (SMOW). The oxygen correction was taken into account for  $\delta^{13}\text{C}_{\text{samp}}$  (PDB).

**Results and discussion.** Medium- and coarse-grained and sometimes up to gravelitic (Fig. 1, 2) sandstones (up to 90 % of the total volume), and dark to black fine-grained argillites and aleurolites are main rocks of the three components flysch in the studied area. Beds of dark-gray to black limestones, dolostones and marls are sporadically found along the geological sections.

Psammitic textures and massive structures are typical for sandstones, which are composed mainly by quartz-carbonate lithocrystalloclastic varieties. Separate fragments (0,1–0,5 mm in size) are represented by quartz (up to 50 % of volume), carbonates (more than 50 % of volume), and microquartzites, plagioclase, microcline, mica (first per cents) and rare biotite and glauconite. Some foraminifera and ore minerals relicts are also found. Clay-carbonate cement of the sandstones (about 5 % of the volume) is mainly film-like.

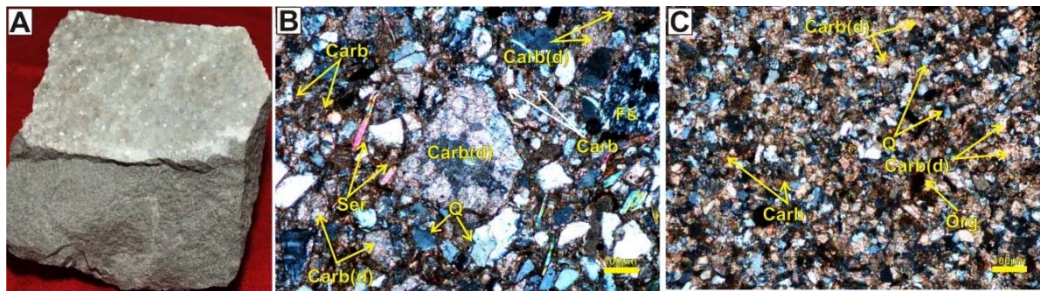


Fig. 1. Sandstone with late calcite druse (A) and typical thin sections of the carbonate rocks from the Krosno Formation: B – poorly sorted, fine-grained clastic sandstone (Skotarske village, left bank of the Vicha river); C – sericitic, well sorted, fine-grained clastic sandstone (Skotarske and Guklyviy villages); Symbols used: Carb (d) – detrital carbonate, Q – quartz, Carb – carbonate cement, Fs – feldspar, Ser – sericite, C – calcite veins

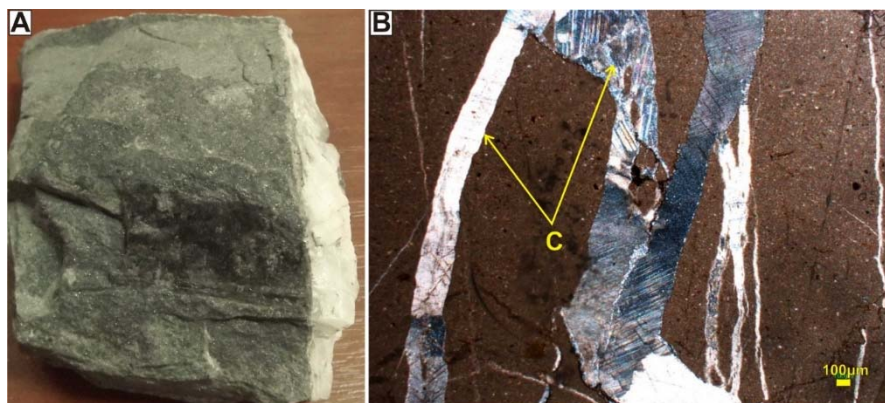


Fig. 2. Siltstone (A) and typical thin section of the carbonate rocks from the Krosno Formation – siltstone with late calcite veins, new Beskyd tunnel (B). Symbols used: C – calcite veins

Mineral composition of the argillites, aleurolites and sandstones is similar, but with lower amounts of quartz (less than 5 %), sericite (less than 50 %), and carbonates (more than 50 %).

Pelithomorphic (rich in clay) limestone includes point-like quartz grains and separate plagioclase grains, and is characterized by pelitic texture and massive structure. The rocks contain coal-clay, sometimes ore minerals, and fragments (0,01–0,08 mm in size). Cement of the rocks is clay-carbonate, sometimes clay-ferrous-carbonate. Texture of rocks is aleuopelitic, structure – massive, sometimes massive-banded due to intercalations of intervals with different proportions of clay and carbonate amounts.

Separate sandstone beds have most significant thickness (up to 10 m) in comparison to subordinated thickness of argillites and aleurolites (up to few meters). Thickness of limestones, dolostones and marls layers are not more than a few centimeters.

**Carbonate contents and its composition.** Total amounts of carbonates in the studied flysch rocks of the Krosno Formation are variable (Table 1). Besides samples

with late carbonates we determined significant contents of carbonates almost all over the investigated area. Most high values of carbonates (up to 73,38–77,11 wt.%) as well as its lowest contents (first per cents) were found among the different sectors. There is no important distinction in carbonate contents within the flysch rocks different in composition and structures.

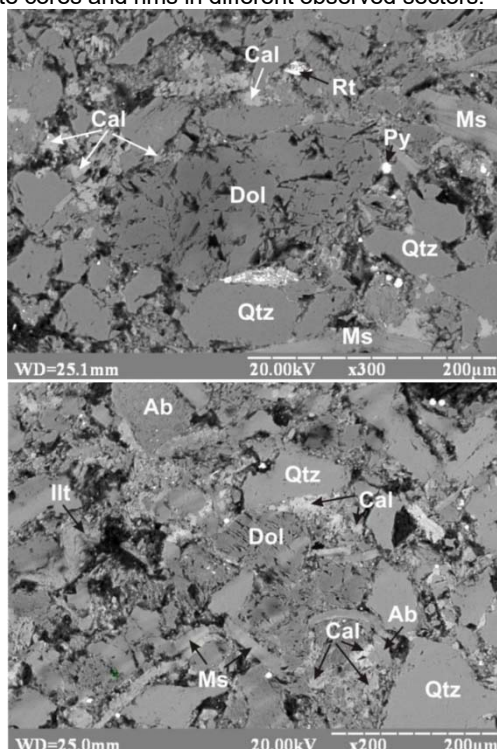
According to X-ray powder diffraction observations on whole-rock samples, carbonates are represented by calcite (dn/3,029; 2,088; 1,912; 1,869) and dolomite (dn/2,89; 2,65; 2,18; 1,78). Due to higher intensity of basal reflects dolomite is dominant phase in the observed samples and its total amount is about three times more than calcite.

Microbeam analyses were carried out on the previously prepared and polished samples of the carbonate-bearing flysch rocks. Quartz, dolomite, calcite, muscovite, illite, albite in different proportions are main minerals of the rocks (Fig. 3). Detrital coarse fragments of quartz and dolomite have irregular shapes and are cemented by fine-grained calcite, muscovite, illite, and rare grains of plagioclase.

**Table 1. Carbonate contents in flysch rocks from the Krosno Formation**

№ of samples	Sectors of location	Total amount of carbonates, wt. %
1A	Beskyd	21,04
6A	Beskyd	67,52
7A	Beskyd	24,65
13A	Beskyd	27,21
15A	Beskyd	25,10
33	Skotarske	23,60
36	Skotarske	33,65
37	Skotarske	29,12
38	Skotarske	73,38
39	Skotarske	63,76
49	Huklyvyy	36,02
53	Huklyvyy	77,11
54	Huklyvyy	36,77
55	Huklyvyy	35,75
64	Volovets	10,50
66	Volovets	14,32

Separate dolomite clasts (see Fig. 3) have different size (from 100 up to 200 mk) and almost pure chemical compositions. Crystallochemical formula of the dolomite –  $Ca_{1,01-1,04}(Mg_{0,90-0,93}Fe^{2+}_{0,00-0,01})_{0,91-0,93}[CO_3]_2$  reflects very low concentrations of the iron admixture and is similar for dolomite cores and rims in different observed sectors.



**Fig. 3. Back-scattered image of the sandstones: detrital dolomite (Dol) and calcites (Cal) cement, Ms – muscovite, Py – pyrite, Rt – rutyl, Qtz – quartz, Ab – albite, Ill – ilmenite**



Calcite, muscovite, illite, plagioclase are common minerals of the cement. Isometric grains of pyrite (up to 10 mk) and short columns up to needle shape rutile crystals (up to 20 mk) are found sporadically, too. Fine grained and commonly isometric calcite (up to 20 mk) is typical cement of dolomite and quartz irregular clasts (see Fig. 3).

According to calculated crystallochemical formula –  $\text{Ca}_{0,90-0,95}(\text{Mg}_{0,02}\text{Fe}^{2+}_{0,00-0,02})_{0,95-0,98}[\text{CO}_3]_2$  calcite has also pure chemical composition. no significant admixtures are found in different grains of calcite.

**C and O isotope composition.** Carbonates from the initial flysch rocks have  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values similar to those of the typical marine limestone carbonates and are limited in a relatively narrow field (Fig. 4).

The spatial and composition relationship between carbonates of the first generation and druse mineralization indicates their commonness. Late carbonates were formed during faults development in lithified rocks: they have the characteristics of the open cavities. Carbon and oxygen data of the late carbonates commonly close to  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values determine for primary carbonates. It can be a good evidence for their inheritance, and formation of the late carbonates from solutions that actively interact with the host rocks. But some calcites enriched in heavy  $^{13}\text{C}$  isotope ( $\delta^{13}\text{C}$  up to +7,2 ‰) were formed from mixing fluids. Late aragonite enriched in heavy carbon isotope  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$  up to +9,5 ‰) confirms possible connection between aragonite and neighboring ore mineralization [7].

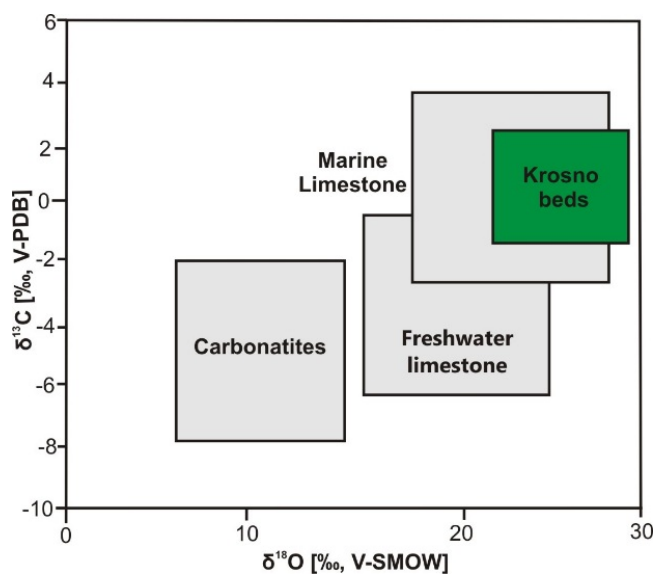


Fig. 4.  $\delta^{13}\text{C}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$  diagram showing field of the stable isotopes values in the measured primary carbonates (green) concerning of the main nature carbon and oxygen reservoirs (after [16])

**Conclusions.** Sandstones, argillites and aleurolites are main components of the flysch formation of the Krosno Zone within the new Beskyd tunnel at the Carpathians watershed and surrounding sectors near Skotarske, Guklyvuy, Volovets villages, etc. Limestones, dolostones and marls are developed sporadically all over this area.

Carbonates are widely distributed in variable amounts in the flysch rocks. Most high values of carbonates (up to 77,11 wt.%) as well as its lowest contents (a few per cent) were found among the different sectors. Dolomite is dominant phase and its total amount is about three times more than calcite. Two main different age morphological and mineralogical generations of carbonates are distinguished within the rocks of the Krosno Zone. Early generation of the carbonates is represented by coarse grained detrital dolomite and finer calcite as cement. Late generation of big in size crystals of carbonates is main component of the carbonate, carbonate-quartz, and carbonate-sulphide druses and veins, which are developed locally.

Studied carbonate-bearing rocks are regarded as calcilithites after the Folk's classification due to significant amounts of terrigenous carbonates. According to calculated petrochemical data ( $F = 0,11$ ,  $A = 26$ ,  $K = -21$ ) investigated flysch rocks of the Krosno Formation are represented by clay greywacke [8] and greywacke – litharenity ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - 0,77$  and  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 4,5$ ) after [20]. Taking into consideration terrigenous carbonates occurring everywhere in the Krosno Zone we should conclude about importance of the third

detritus component at the Folk's diagram [12, 13] besides quartz and feldspars. At the same time wide variations of carbonate contents (from 10,50 up to 77,11 wt.%) indicate presence of facial heterogeneity within the Krosno Zone. Paragenetic relationships and similarity of the flysch rocks and significant variations of the detrital carbonates among them point to not only quantitative but also genetic differences between components at the Folk's diagram.

Terrigenous carbonates from the initial flysch rocks have  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values similar to those of the typical marine limestone carbonates and are limited in a relatively narrow field. It is additional evidence of local sources for the flysch formations rich in carbonates.

#### Список використаних джерел

1. Афанасьева И.М. Петрогеохимические особенности флишевой формации южного склона Советских Карпат / И.М. Афанасьева. – К. : Наук. думка, 1979. – 244 с.
2. Габинет М.П. Изотопный состав углерода карбонатов в олигоценовом флише Карпат. / М.П. Габинет, Г.П. Мамчур // Вопросы минералогии осадочных образований. – Львов : Львов. гос. ун-т, 1970. – Кн. 8. – С. 119–125.
3. Гнилко О. Про північно-східну границю Кросненської тектонічної зони в Українських Карпатах / О. Гнилко // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2010. – № 2 (151). – С. 44–57.
4. Головченко Д. Мінеральний склад та поширення карбонатних утворень Кросненської світи Українських Карпат / Д. Головченко, Т. Кшановська // Мінерал. зб. – 2004. – № 54, вип. 2. – С. 230–234.
5. Гулій В.М. Пізня сульфідно-кварц-карбонатна мінералізація в породах Кросненської зони в межах траси нового Бескидського тунелю / В.М. Гулій, С.Я. Кріль, І. Ємельянов та ін. // Мінерал. зб. – 2016. – № 66, Вип. 2. – С. 77–87.

6. Даниш В.В. Геологія західної частини південного схилу Українських Карпат / В.В. Даниш. – К.: Наук. думка, 1973. – 116 с.

7. Криль С. Ізотопний склад жильних карбонатів зони Рахівсько-Тисенського розлому Українських Карпат / С. Криль // Мінерал. журн. – 2014. – № 3. – С. 30–39.

8. Предовский А.А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия / А.А. Предовский. – Л.: Наука, 1980. – 152 с.

9. Шутов В.Д. Обзор и анализ минералогических классификаций песчаных пород / В.Д. Шутов // Литология и полезные ископаемые. – 1965. – № 1. – С. 95–112.

10. Arribas J. Petrographic evidence of different provenance in two alluvial fan systems (Palaeogene of the northern Tajo Basin, Spain) / J. Arribas, E. Arribas // Geological Society London Special Publications. – 1991. – № 57(1). – P. 263–271.

11. Bojanowski M. The onset of orogenic activity recorded in the Krosno shales from the Grybyw unit (Polish Outer Carpathians) / M. Bojanowski // Acta Geologica Polonica. – 2007. – № 57(4). – P. 509–522.

12. Folk R.L. Practical petrographic classification of limestones / R.L. Folk // Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull. – 1959. – Vol. 43. – P. 1–38.

13. Folk R.L. Petrology of sedimentary rocks / R.L. Folk. – Austin, Texas: Hemphill's Bookstore, 1974. – 182 p.

14. Geology and hydrocarbon resources of the Outer Carpathians, Poland, Slovakia, and Ukraine: general geology / A. Slaczkza, S. Kruglov, J. Golonka et al. // The Carpathians and their foreland: Geology and hydrocarbon resources: AAPG Memoir. – Tulsa, Oklahoma, USA., 2006. – № 84. – P. 221–258.

15. Ham W.E. Algal Origin of the 'Birdseye' Limestone in the McLish Formation / W.E. Ham // Proc. Oklahoma Acad. Sci. – 1954. – Vol. 33. – P. 200–203.

16. Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry / J. Hoefs. – Verlag-Berlin-Heidelberg: Springer. XII, 2009. – 286p.

17. Ingersoll R. Provenance of impure calcilithites in the Laramide foreland of Southwestern Montana / R. Ingersoll, W. Cavazza, S. Graham // Journal of Sedimentary Petrology. – 1987. – Vol. 57, № 6. – P. 995–1003.

18. Interpreting siliciclastic-carbonate detrital modes in foreland basin systems: An example from Upper Miocene arenites of the central Apennines, Italy. / S. Critelli, E. Le Pera, F. Galluzzo et al. // Geological Society of America Special Paper. – 2007. – № 420. – P. 107–133.

19. Johnson E. Petrographic descriptions of selected rock specimens from the Meade Peak phosphatic shale member, Phosphoria Formation (Permian), Southeastern Idaho. U.S. / E. Johnson, R. Grauch, J. Herring. – Geological Survey Scientific Investigations Report, 2007. – № 5223. – 17 p.

20. Pettijohn F.J. Sedimentary rocks / F.J. Pettijohn. – Third Edition. Harper & Row Publishers. N-Y, 1975. – 751 p.

#### References

1. Afanasyeva, I.M. (1979). Petrogeochemical features of the flysch formations at the southern slope of the Soviet Carpathians. K.: Naukova Dumka, 244 p. [In Ukrainian].

2. Gabynet, M.P., Mamchur, G.P. (1970). Carbon isotope composition in carbonate from Oligocene flysch of the Carpathians. Book 8. Voprosy mineralogii osadochnykh obrazovaniy. Lviv University, 119–125. [In Russian].

3. Gnylko, O. (2010). On the north-eastern boundary of the Krosno tectonic zone in the Ukrainian Carpathians. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, 2 (151), 44–57. [In Ukrainian].

4. Holovchenko, D., Kshanovska, T. (2004). Mineral composition and distribution of carbonaceous rocks in the Krosno Suite of the Ukrainian Carpathians. *Mineralogical Collection*, 54 (2), 230–234. [In Ukrainian].

5. Guliy, V., Kril, S., Yemelyanov, I., Kuzemko, Ya., Stepanov, V. (2016). Late sulphide-quartz-carbonate mineralization in the Krosno Zone rocks within the route of new Beskydskiy tunnel. *Mineralogical Review*, 66, 2, 77–87. [In Ukrainian].

6. Danysh, V. (1973). Geology of the western part of the southern slope of the Ukrainian Carpathians. K.: Naukova Dumka, 116 p. [In Ukrainian].

7. Kril, S. Ya. (2014). Isotopic composition of the carbonate veins in the Rakhiv-Tysa Fault Zone (Transcarpathians). *Mineral. Journ.*, 36, 3, 30–39. [In Ukrainian].

8. Predovskiy, A.A. (1980). Reconstruction of the sedimentation and volcanism conditions in Early Precambrian. Lviv: Nauka, 152 p. [In Russian].

9. Shutov, V.D. (1965). Review and analysis of mineralogical classification of sandy rocks. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1, 95–112. [In Russian].

10. Arribas, J. Arribas, E. (1991). Petrographic evidence of different provenance in two alluvial fan systems (Palaeogene of the northern Tajo Basin, Spain). *Geological Society London Special Publications*, 57(1), 263–271.

11. Bojanowski, M. (2007). The onset of orogenic activity recorded in the Krosno shales from the Grybyw unit (Polish Outer Carpathians). *Acta Geologica Polonica*, 57 (4), 509–522.

12. Folk, R. L. (1959). Practical petrographic classification of limestones. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, 43, 1–38.

13. Folk, R. L. (1974). Petrology of sedimentary rocks. Austin, Texas, Hemphill's Bookstore, 182 p.

14. Ślaczka, A., Kruglov, S., Golonka, J., Oszczytko, N., Popadyuk, I. (2006). Geology and hydrocarbon resources of the Outer Carpathians, Poland, Slovakia, and Ukraine: general geology. *AAPG Mem.*, 84, 221–258.

15. Ham, W. E. (1954). Algal Origin of the 'Birdseye' Limestone in the McLish Formation. *Proc. Oklahoma Acad. Sci.*, 33, 200–203.

16. Hoefs, J. (2009). Stable Isotope Geochemistry. Verlag-Berlin-Heidelberg: Springer. XII, 286 p.

17. Ingersoll, R., Cavazza, W., Graham, S. (1987). Provenance of impure calcilithites in the Laramide foreland of Southwestern Montana. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57, 6, 995–1003.

18. Critelli, S., Le Pera, E., Galluzzo, F. et al. (2007). Interpreting siliciclastic-carbonate detrital modes in foreland basin systems: An example from Upper Miocene arenites of the central Apennines, Italy. *Geological Society of America Special Paper*, 420, 107–133.

19. Johnson, E., Grauch, R., Herring, J. (2007). Petrographic descriptions of selected rock specimens from the Meade Peak phosphatic shale member, Phosphoria Formation (Permian), Southeastern Idaho. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 5223, 17 p.

20. Pettijohn, F.J. (1975). Sedimentary rocks. Third Edition. Harper & Row Publishers. N-Y, 751 p.

Надійшла до редколегії 27.09.17

В. Гулій<sup>1</sup>, д-р геол.-мінерал. наук, проф.

E-mail: vguul@ukr.net,

С. Криль<sup>1</sup>, канд. геол. наук, інж.

E-mail: solia\_kr@ukr.net,

В. Загнітко<sup>2</sup>, д-р геол.-мінерал. наук, проф.,

В. Степанов<sup>3</sup>, канд. геол.-мінерал. наук, доц.,

Я. Куземко<sup>3</sup>, геолог,

Н. Білик<sup>1</sup>, асист.

<sup>1</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка

Геологічний факультет, вул. Грушевського, 4, м. Львів, 79005, Україна,

<sup>2</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка

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

<sup>3</sup>ПАО "Інтербудтунель", вул. Промислова, 1, м. Київ, 01013, Україна

## КАЛЬКЛІТИТИ КРОСНЕНСЬКОЇ ЗОНИ СХІДНИХ КАРПАТ (УКРАЇНА)

Наведено результати вивчення розподілу карбонатів і визначення їхньої кількості у флішових породах Кросненської зони (Українські Карпати), які представлені перешаруванням переважно пісковиків, аргілітів і алевролітів, а також вапняками, доломітами і мергелями, які виявляються спорадично. Карбонати широко розповсюджені в змінних кількостях у породах, які відкриті при проходженні нового Бескидського тунелю у водороздільній частині Карпат і на оточуючих ділянках. Високий вміст карбонатів (до 77,11 ваг.%), як і їх невеликі кількості (перші відсотки), виявлені на різних ділянках. Рентгенівські дифракційні дослідження проб показали, що в породах присутні кальцит і доломіт. Кількість доломіту приблизно в три рази більша ніж кальциту.

Дві основні різновікові генерації карбонатів встановлено в породах флішу за результатами петрографічних і мікрорентгеноспектральних аналізів. Ранні карбонати представлені грубозернистим уламковим доломітом і тонкозернистим кальцитом, який відіграє роль цементу. Пізні генерації крупних кристалів кальциту є основними в карбонатних, карбонат-кварцових і карбонат-сульфідних друзах і жилах, які розповсюджені локально. Досліджені карбонатноносні породи складені значною кількістю теригенних карбонатів і, згідно з класифікацією Фолка, розглядаються як кальклітїти. Карбонати вихідних флішових порід мають значення  $\delta^{13}\text{C}$  і  $\delta^{18}\text{O}$ , які аналогічні значенням виявленим у карбонатах морських вапняків. Їхні фігуративні точки локалізовані у вузькому полі, що є додатковим аргументом на користь місцевих джерел карбонатів у породах флішової формації.

Ключові слова: кальклітїти, фліш, Кросненська зона, пісковики, карбонати, ізотопи С і О.

В. Гулий<sup>1</sup>, д-р геол.-минерал. наук, проф.

E-mail: vguil@ukr.net,

С. Криль<sup>1</sup>, канд. геол. наук, инж.

E-mail: solia\_kr@ukr.net,

В. Загнитко<sup>2</sup>, д-р геол.-минерал. наук, проф.,

В. Степанов<sup>1</sup>, канд. геол.-минерал. наук, доц.,

Я. Куземко<sup>3</sup>, геолог,

Н. Билык<sup>1</sup>, асист.

<sup>1</sup>Львовский национальный университет имени Ивана Франка  
Геологический факультет, ул. Грушевского, 4, г. Львов, 79005, Украина,

<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина,

<sup>3</sup>ПАО "Интербудтунель", ул. Промышленная, 1, г. Киев, 01013, Украина

### КАЛЬКЛИТИТЫ КРОСНЕНСКОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНЫХ КАРПАТ (УКРАИНА)

*Приведены результаты изучения распределения карбонатов и оценки количества их во флишевых породах Кросненской зоны (Украинские Карпаты), которые представлены переслаиванием, главным образом, песчаников, аргиллитов и алевролитов, а также спорадически проявленными известняками, доломитами и мергелями. Карбонаты широко распространены в переменных количествах в породах, вскрытых при прохождении нового Бескидского тоннеля в водораздельной части Карпат и на окружающих участках. Высокие содержания карбонатов (до 77,11 вес.%), как и их низкие содержания (первые проценты), были обнаружены на различных участках. Согласно рентгеновским дифракционным исследованиям образцов пород карбонаты представлены кальцитом и доломитом. Доломит преобладает – его общее содержание примерно в три раза больше, чем кальцита.*

*Две основные генерации карбонатов, отличающиеся по возрасту, установлены в породах флиша по результатам петрографических и микрорентгеноспектральных анализов. Ранние карбонаты представлены грубозернистым обломочным доломитом и тонкозернистым кальцитом, который играет роль цемента. Поздние генерации крупных кристаллов кальцита являются главной составной частью карбонатных, карбонат-кварцевых и карбонат-сульфидных друз и жил, которые развиты локально. Изученные карбонатсодержащие породы содержат значительное количество терригенных карбонатов и согласно классификации Фолка рассматриваются как кальклититы. Карбонаты исходных флишевых пород имеют  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  значения, которые аналогичны карбонатам морских известняков. Их фигуративные точки локализованы в узком поле, что является дополнительным аргументом в пользу местных источников карбонатов в породах флишевой формации.*

*Ключевые слова:* кальклититы, флиш, Кросненская зона, песчаники, карбонаты, изотопы С и О.

## ГЕОФІЗИКА

УДК 550.83:552.1:537

С. Выжва, д-р геол. наук, проф.  
E-mail: vsa@univ.net.ua,  
В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.  
E-mail: vladvam@gmail.com,  
И. Онищук, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.  
E-mail: oivan1@ukr.net

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

## ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД МАЙКОПСКОЙ СЕРИИ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

*(Рекомендовано членом редакционной коллегии канд. геол. наук, старш. науч. співроб. І.М. Безродною)*

Целью статьи является оценка петрофизических параметров пород-коллекторов традиционных и нетрадиционных источников углеводородов майкопской серии Крымско-Черноморского региона. Статья основывается на собственных экспериментальных исследованиях, проведенных на базе петрофизической лаборатории УНИ "Институт геологии" Киевского национального университета имени Тараса Шевченко. Изучены петрофизические свойства глинистых пород майкопской серии СЗ части шельфа Черного моря, центральной части Крымского полуострова; Керченского полуострова; Прикерченской части шельфа Азовского моря; северного шельфа Азовского моря; Прикерченской части шельфа Черного моря, а также традиционных коллекторов (преимущественно известняки и песчаники) СЗ части шельфа Черного моря; северной части шельфа Азовского моря; Прикерченской части шельфа Черного моря. Впервые дана комплексная характеристика петрофизических параметров нетрадиционных глинистых коллекторов майкопской серии, проведено их сопоставление с петрофизическими характеристиками традиционных коллекторов.

Нетрадиционные коллекторы (глины, аргиллиты) характеризуются значительными колебаниями петрофизических параметров, что, очевидно, связано с разной степенью трещиноватости образцов. Так, объемная плотность сухих образцов глинистых пород майкопской серии изменяется от 1313 до 2621 кг/м<sup>3</sup> (средняя 1760 кг/м<sup>3</sup>), при насыщении образцов керосином – от 1728 до 2708 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2081 кг/м<sup>3</sup>), а кажущаяся минералогическая плотность – от 2434 до 3022 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2584 кг/м<sup>3</sup>). Значение открытой пористости образцов насыщенных керосином изменяется от 0,3 до 31,7 % (средняя 19,6 %). Открытая пористость "по азоту" изменяется от 6,6 до 38,1 % (средняя 25,7 %).

Традиционные породы-коллекторы (песчаники, известняки) характеризуются высокими емкостно-фильтрационными свойствами. Объемная плотность сухих образцов песчаников и известняков майкопской серии изменяется от 1986 до 2638 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2341 кг/м<sup>3</sup>), при насыщении образцов керосином – от 2175 до 2662 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2647 кг/м<sup>3</sup>), кажущаяся минералогическая плотность – от 2474 до 2724 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2630 кг/м<sup>3</sup>). Значение открытой пористости при насыщении образцов керосином изменяются от 0,7 до 24,1 % при среднем значении 11,0 %, при насыщении образцов моделью пластового раствора (по NaCl) – от 0,8 до 25,0 % (средняя 11,3 %), а открытая пористость "по азоту" – от 1,5 до 25,9 % (средняя 12,9 %).

**Ключевые слова:** майкопская серия, петрофизические свойства, традиционные и нетрадиционные коллекторы.

**Постановка проблемы.** Оligоцен-миоценовая майкопская серия широко распространена во всех регионах южного обрамления Восточноевропейской платформы, в том числе в пределах Черноморско-Крымского палеобассейна, где, как считается, она имеет важное газонефтегенерирующее значение. В литологической структуре майкопской серии преобладают глинистые разности с прослоями алевролитов и песчаников. Последние рассматриваются как коллектора традиционных месторождений нефти и газа, часто связанных с породами майкопской серии. В последнее время поднимается вопрос о возможном наличии нетрадиционных залежей углеводородов, связанных с глинистыми породами майкопской серии. Одним из важных вопросов оценки нефтегазогенерационного потенциала перспективных толщ является характеристика петрофизических свойств как традиционных, так и нетрадиционных коллекторов. Это обуславливает актуальность изучения последних.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Существует обширная литература по майкопской серии [3, 4, 7–9 и др.], где детально рассмотрены особенности ее состава и строения, литологии и стратиграфии, геохимии, нефтегенерирующего потенциала, однако, систематические исследования петрофизических свойств ее пород, особенно глинистых нетрадиционных пород-коллекторов не проводились.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** На современном этапе проблема поисков и изучения нетрадиционных источников углеводородов (сланцевый газ, сланцевая нефть, газ уплотненных коллекторов и др.) приобретает все большую актуальность. При оценке перспективности на сланцевый газ геологических структур и комплексов, кроме экономических и геолого-геометрических параметров, содержания

органического вещества и степени термической переработки, важное значение имеют петрофизические параметры горных пород. Эти данные необходимы при интерпретации материалов геофизических исследований поисково-разведочных скважин, а также при оценке параметров гидроразрыва пласта. Следует отметить, что петрофизические исследования до недавнего времени были направлены, в основном, на изучение пород-коллекторов традиционных источников углеводородов и на данном этапе петрофизические параметры пород-коллекторов сланцевого газа являются слабо изученными.

**Целью исследований** была оценка петрофизических параметров пород-коллекторов традиционных и нетрадиционных источников углеводородов майкопской серии Азово-Черноморского региона как основы комплексного анализа их физических свойств [10, 12, 13, 16, 19].

В статье приведены результаты комплексных исследований петрофизических свойств 42 образцов керн глинистых пород майкопской серии северо-западной части шельфа Черного моря (скв. Архангельская-1, Голицына-1, 6, 7, 9, 12, Шмидта-6, 9, 11, Гамбурцева-2), центральной части Крымского полуострова (скв. Джанкойская-1); Керченского полуострова (скв. Фонтановская-6, 12); Прикерченской части шельфа Азовского моря (скв. Северо-Казантипская-3); северной части шельфа Азовского моря (скв. Матросская-1), Прикерченской части шельфа Черного моря (скв. Субботина-1, 403), а также 58 образцов керн традиционных коллекторов (преимущественно известняки и песчаники) СЗ части шельфа Черного моря (скв. Шмидта-6, 9, 11, Гамбурцева-2); северной части шельфа Азовского моря (скв. Матросская-1); Прикерченской части шельфа Черного моря (скв. Субботина-403).

**Экспериментальные исследования.** В петрофизической лаборатории УНИ "Институт геологии" Киевского национального университета имени Тараса Шевченко выполнен комплекс петрофизических исследований, включающий определение (табл. 1–2):

- плотности пород (сухих, насыщенных раствором NaCl и керосином);
- открытой пористости (методами насыщения азотом, раствором NaCl и керосином);
- проницаемости (методом стационарной фильтрации азота);
- удельного электрического сопротивления (сухих образцов и насыщенных раствором NaCl);
- интервального времени (скорости) продольных упругих волн.

**Плотность.** Объемная плотность исследованных пород в сухом состоянии определялась путем взвешивания и определения геометрических размеров лабораторных образцов, а насыщенных образцов – методом гидростатического взвешивания по стандартной методике [14, 15, 18]. Для измерений применялись цифровые аналитические весы WPS 360/c/2 (точность  $\pm 0,001$  г). Результаты измерений нетрадиционных коллекторов майкопской серии приведены в табл. 1, традиционных – в табл. 2.

Объемная плотность сухих образцов глинистых пород майкопской серии изменяется от 1313 до 2621 кг/м<sup>3</sup> (средняя 1760 кг/м<sup>3</sup>), а для песчаников и известняков – от 1986 до 2638 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2341 кг/м<sup>3</sup>). При насыщении образцов керосином объемная плотность глинистых пород изменяется от 1728 до 2708 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2081 кг/м<sup>3</sup>), а традиционных коллекторов – от 2175 до 2662 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2647 кг/м<sup>3</sup>). Кажущаяся минералогическая плотность глинистых пород меняется от 2434 до 3022 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2584 кг/м<sup>3</sup>), а традиционных коллекторов – от 2474 до 2724 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2630 кг/м<sup>3</sup>).

Широкие пределы колебания объемной плотности свидетельствуют об изменчивости литологии и пористости образцов керна. Нетрадиционные коллекторы характеризуются резко неоднородным распределением плотности, что, вероятно, связано как с их составом, так и с разной степенью трещиноватости образцов.

**Пористость.** Пустотное пространство породы характеризуется пористостью, а способность породы пропускать через себя флюиды – проницаемостью. Эти

свойства породы определяют тип флюида, его количество, скорость движения и технологию извлечения. Другие важные свойства пород-коллекторов – их структура и содержание воды в зависимости от капиллярного давления, а также извилистость поровых каналов. Структура осадочных пород в значительной степени определяется формой и окатанностью зерен, их размерами, сортировкой, ориентировкой и типом упаковки, химическим составом [14, 15]. Комплексное изучение этих параметров позволяет получить информацию о диагенетических и катагенетических процессах и о механизмах, которые действовали во время транспортировки и отложения осадочного материала, уплотнения и деформации осадков. По структуре породы можно судить о ее пористости и проницаемости. Изменения проницаемости можно прогнозировать исходя из изменений размера и формы частиц, распределению поровых каналов в породе.

Пористость породы – важный параметр, который определяет емкость коллектора – свойство породы вмещать флюиды (нефть, газ и воду). Различают общую, открытую и эффективную пористость [14, 15]. Коэффициент открытой пористости определялся весовым методом с использованием цифровых аналитических весов WPS 360/c/2 при насыщении образцов горных пород раствором NaCl – моделью пластовой воды с использованием стандартных методик, а также способом насыщения образца азотом под давлением (газоволюметрическим), с помощью специально разработанной установки.

По результатам лабораторных измерений установлено, что значения открытой пористости, определенные весовым методом при насыщении образцов керна керосином, для глинистых пород майкопской серии изменяются от 0,3 до 31,7 % при среднем значении 19,6 %, а для традиционных коллекторов (песчаников и известняков) – от 0,7 до 24,1 % при среднем значении 11,0 %.

Значения открытой пористости традиционных коллекторов, определенные весовым методом при насыщении образцов керна моделью пластового раствора (по NaCl), меняются от 0,8 до 25,0 % при среднем значении 11,3 %. Для нетрадиционных коллекторов этот показатель не измерялся.

**Таблица 1.** Петрофизические параметры нетрадиционных коллекторов майкопской серии (образцы сухие и насыщенные керосином) [10]

№	№ образца	Скважина	Интервал опробования, м	Порода	Объемная плотность сухой породы, кг/м <sup>3</sup>	Объемная плотность породы с керосином, кг/м <sup>3</sup>	Кажущаяся минералогическая плотность породы, кг/м <sup>3</sup>	Открытая пористость (по азоту), %	Открытая пористость (по керосину), %	Проницаемость, фм <sup>2</sup>	Электрическое сопротивление сухой породы, Ом·м	Интервальное время, мкс/м (сухая порода)	Интервальное время, мкс/м (порода насыщена керосином)
<b>Северо-западная часть шельфа Черного моря</b>													
1	165 ГЛ	Голицына-1	1034	Мергель	2621	2629	2636		0,3	<0,001	3886	192	181
2	162 ГЛ	Голицына-6	1812	"	1811	2122	2562		17,2			–	–
3	162-1 ГЛ	Голицына-6	1812	"	1740	2061	2527		18,4			–	–
4	162-2 ГЛ	Голицына-6	1812	"	1811	2124	2568		17,3			–	–
5	163 ГЛ	Голицына-7	570	"	1426	1831	2556	34,2	28,4			–	–
6	164 ГЛ	Голицына-9	2100	"	2078	2313	2609	14,3	11,3			–	–
7	161 ГЛ	Голицына-12	2710	Аргиллит	2376	2494	2624	6,6	5,0			247	238
8	171-1 АХ	Архангельская-21	867	Аргиллит	1470	1860	2533	33,8	26,6			–	–
9	171-2 АХ	"	867	Аргиллит	1448	1842	2530	30,3	27,2			482	407
10	172 АХ	"	872	Алевролит	1411	1818	2556	32,9	28,9			426	383
11	172-1 АХ	"	872	"	1495	1883	2544	28,2	26,0		1726	437	371
12	173 АХ	"	877	"	1313	1728	2529	38,1	31,7			–	–
13	174 АХ	"	878	"	1376	1796	2584	35,5	30,5			–	–

Закінчення табл. 1

№	№ бразца	Скважина	Интервал опробования, м	Порода	Объемная плотность сухой породы, кг/м <sup>3</sup>	Объемная плотность породы с керосином, кг/м <sup>3</sup>	Кажущаяся минералогическая плотность породы, кг/м <sup>3</sup>	Открытая пористость (по азоту), %	Открытая пористость (по керосину), %	Проницаемость, фм <sup>2</sup>	Электрическое сопротивление сухой породы, Ом·м	Интервальное время, мкс/м (сухая порода)	Интервальное время, мкс/м (порода насыщена керосином)
<b>Центральная часть Крымского полуострова</b>													
14	166 ДЖ	Джанкойская-1	845	Алевролит	1623	1953	2451	27,2	20,3			364	314
15	167 ДЖ	"	866	Аргиллит	1590	1951	2525	26,2	22,7		107555	405	344
16	167-1 ДЖ	"	866	"	1603	1961	2525	27,2	22,3			429	358
17	168 ДЖ	"	876	Мергель	1455	1848	2530	32,7	27,0			-	-
18	168-1 ДЖ	"	876	"	2452	2706	3019	12,4	10,4	0,63		280	247
19	168-2 ДЖ	"	876	"	2453	2708	3022	12,5	10,4			290	250
20	169 ДЖ	"	885	Аргиллит	1625	2002	2606	26,2	23,2			-	-
21	169-1 ДЖ	"	885	"	1662	1975	2434		18,9			376	331
22	169-2 ДЖ	"	885	"	1586	1947	2521		22,8			383	337
23	170 ДЖ	"	892	Песчаник	1590	1963	2562	26,3	23,4		51035	480	405
24	170-1 ДЖ	"	892	"	1552	1930	2550	27,2	24,3		45813		383
25	170-2 ДЖ	"	892	"	1620	1983	2557	26,1	22,4		102386	466	365
<b>Керченский полуостров</b>													
26	180 ФН	Фонтановская-6	3292	Аргиллит	2321	2474	2647	12,4	6,6			286	238
27	179 ФН	Фонтановская-12	3695	Песчаник	2340	2488	2656		6,3			-	-
<b>Прикерченская часть шельфа Азовского моря</b>													
28	151 ПК	Североказан- типская-3	1042	Алевролит	1483	1873	2539		26,3			-	-
29	151-1 ПК	"	1042	Алевролит	1459	1857	2553		27,3			-	-
30	152 ПК	"	1100	Глина	1545	1923	2547		24,5			-	-
31	153 ПК	"	1209	"	1461	1863	2569		27,5				342
32	155 ПК	"	1420	Аргиллит	1532	1908	2529	32,1	24,6			-	-
33	156 ПК	"	1550	"	1622	2012	2648	30,5	24,0		1243	389	351
34	157 ПК	"	2590	"	1897	2228	2698	22,9	17,4	18,74	3911	329	283
35	157-1 ПК	"	2590	"	1873	2209	2690	23,3	17,9			290	281
36	159 ПК	"	2587	"	1883	2214	2686	23,1	17,6	1,66	2472	346	299
37	160 ПК	"	2597	"	1862	2160	2573		16,0			-	-
<b>Прикерченская часть шельфа Черного моря</b>													
38	176 СБ	Субботина-1	1363	Аргиллит	1754	2094	2597		19,4			-	-
39	176-1 СБ	"	1363	"	1980	2195	2462		10,8			326	289
40	176-2 СБ	"	1363	"	1928	2175	2496		12,8			-	-
41	178 СБ	"	1960	"	1762	2075	2523	25,2	17,8			-	-
42	177 СБ	"	2330	"	2041	2235	2470		9,5			-	-

Таблица 2. Петрофизические параметры традиционных коллекторов майкопской серии (образцы сухие, насыщенные керосином и раствором NaCl) [10]

№п.п.	№ образца	Скважина	Интервал опробования, м	Порода	Объемная плотность сухой породы, кг/м <sup>3</sup>	Объемная плотность породы, насыщ. керосином, кг/м <sup>3</sup>	Объемная плотность породы, насыщ. раствором NaCl, кг/м <sup>3</sup>	Кажущаяся минералогическая плотность породы, кг/м <sup>3</sup>	Открытая пористость (по азоту), %	Открытая пористость (по керосину), %	Открытая пористость (по NaCl), %	Проницаемость, фм <sup>2</sup>	Интервальное время, мкс/м (сухая порода)	Интервальное время, мкс/м (порода, насыщенная керосином)	Интервальное время, мкс/м (порода, насыщенная NaCl)	Электрическое сопротивление сухой породы, Ом·м	Электрическое сопротивление породы, насыщенной NaCl, Ом·м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>СЗ часть шельфа Черного моря</b>																	
1	211 ШМ	Шмидта-6	3580–3592	Известняк	2560	2583	2624	2637	4,8	2,9	2,3	< 0,001	180	177	179	5070	38,5
2	212 ШМ	"	3622–3632	"	2577	2602	2644	2662	5,1	3,2	2,8	0,45	175	167	171	15551	39,2
3	212-1 ШМ	"	3622–3632	"	2574	2601	2638	2665	5,2	3,4	3,4	0,28	206	173	187	6548	37,4
4	208 ШМ	Шмидта-9	3126–3139	"	2448	2472	2654	2524	5,0	3,0	2,4	< 0,001	207	171	177	3783	32,9
5	209 ШМ	"	3110–3126	"	2522	2549	2614	2610	4,2	3,4	2,9	< 0,001	228	191	201	1055	17,0
6	209-1 ШМ	"	3110–3126	"	2519	2546	2611	2610	4,4	3,5	2,9	< 0,001	203	193	205	1752	16,6
7	210 ШМ	"	3110–3126	"	2597	2611	2674	2644	3,2	1,8	1,8	< 0,001	189	182	185	1298	33,6
8	206 ШМ	Шмидта-11	2957–2966	"	2543	2584	2625	2684	5,9	5,3	4,7	0,07	210	186	210	9558	27,4

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
9	207 ШМ	"	2966–2972	"	2562	2588	2631	2651	4,7	3,4	2,7	<0,001	197	171	169	10460	50,3
10	207-1 ШМ	"	2966–2972	"	2559	2587	2631	2656	5,8	3,7	2,9	<0,001	198	175	171	24167	45,5
11	213 ГМ	Гамбурцева-2	2082–2090	"	2438	2508	2588	2680	10,5	9,0	7,9		205	199	200	2473	8,7
12	214 ГМ	"	2390–2400	"	2486	2541	2614	2673	9,1	7,0	6,4		184	183	183	5339	11,7
13	215 ГМ	"	2560–2569	"	2605	2626	2691	2677	3,9	2,7	2,3	0,01	170	165	165	84958	43,0
14	215-1 ГМ	"	2560–2569	"	2603	2627	2694	2686	4,1	3,1	2,7	0,03	179	168	167	95873	35,8
15	216 ГМ	"	3270–3276	"	2595	2596	2657	2597	1,5	0,7	0,8	0,01	189	191	187	660	43,3
16	216-1 ГМ	"	3270–3276	"	2598	2602	2660	2611	1,9	0,8	1,0	<0,001	241	189	191	651	40,0
<b>Северная часть шельфа Азовского моря</b>																	
17	201 МА	Матросская-1	1053–1059	Песчаник	2417	2491	2567	2670	11,0	9,5	9,6	8,23	312	253	240	20632	4,9
18	201-1 МА	"	1053–1059	"	2430	2500	2575	2671	10,7	9,0	9,2	0,37	311	246	233	13376	5,4
19	202 МА	"	1232–1241	Известняк	2105	2243	2331	2552	20,8	17,5	17,9	1,25	303	293	308	1335	2,2
20	202-1 МА	"	1232–1241	"	2117	2244	2333	2526	20,2	16,2	18,0	0,11	310	290	307	1204	2,2
21	203 МА	"	1300–1309	"	2069	2198	2283	2475	20,1	16,4	17,0	4,61	292	293	316	601	2,2
22	203-1 МА	"	1300–1309	"	2079	2204	2288	2474	20,5	16,0	17,4	0,15	314	234	319	714	2,1
23	204 МА	"	1500–1508	"	2314	2401	2464	2602	13,4	11,1	11,7	0,42	275	262	304	372	2,6
24	204-1 МА	"	1500–1508	"	2316	2405	2470	2612	13,5	11,3	11,6	0,08	277	207	302	553	2,6
25	205 МА	"	1765–1775	Песчаник	2001	2184	2277	2612	25,7	23,4	24,1	1,72	420	382	382	515	1,3
26	205-1 МА	"	1765–1775	"	1986	2175	2267	2616	25,9	24,1	24,8	2,74	466	401	409	548	1,2
<b>Прикерченская часть шельфа Черного моря</b>																	
27	186 СБ	Субботина-1	1948–1954	Песчаник	2063	2233	2305	2632	24,4	21,6	21,9	9,16	404	352	394	1950	2,3
28	186-1 СБ	"	1948–1954	"	2048	2222	2293	2633	24,3	22,2	22,4	16,05	388	340	376	2389	2,1
29	187 СБ	"	1960–1965	"	2156	2299	2355	2636	20,8	18,2	18,7	8,43	370	321	354	2221	2,7
30	188 СБ	"	2342–2343	Алевролит	2259	2371	2423	2636	17,3	14,3	14,9	6,17	374	297	344	1224	3,2
31	188-1 СБ	"	2342–2343	"	2261	2371	2420	2632	15,8	14,1	14,9	6,93	372	315	365	688	3,1
32	189 СБ	"	2342–2343	Алевропесчаник	2268	2373	2424	2619	16,3	13,4	14,1	30,55	389	307	404	1200	3,2
33	189-1 СБ	"	2342–2343	"	2285	2386	2437	2622	16,1	14,0	13,5	18,25	353	300	345	1399	3,5
34	190 СБ	Субботина-403	2439–2444	Песчаник	2292	2390	2420	2641	15,27	12,54	12,52	6,07	316	221	258	87879	3,7
35	190-1 СБ	"	2439–2444	"	2260	2357	2388	2636	16,97	12,66	12,56	4,65	351	244	291	6592	3,3
36	190-2 СБ	"	2439–2444	"	2294	2390	2420	2641	15,06	12,38	12,29	4,66	296	207	262	13166	3,8
37	191 СБ	"	2591–2596	"	2288	2388	2420	2638	16,2	12,89	12,69	6,39	356	246	296	5788	3,3
38	191-1 СБ	"	2591–2596	"	2296	2396	2426	2639	15,92	12,8	12,75	6,75	343	240	292	22366	3,4
39	192 СБ	"	2596–2605	"	2313	2405	2430	2643	14,45	11,52	11,7	3,10	377	263	311	49662	3,6
40	192-1 СБ	"	2596–2605	"	2314	2404	2433	2642	14,69	11,79	11,62	3,22	383	250	293	10653	3,4
41	193 СБ	"	2596–2605	"	2037	2213	2225	2625	24,3	22,4	25,0		371	329	359	4972	1,3
42	194 СБ	"	2596–2605	"	2191	2325	2348	2644	19,1	17,1	22,0	3,63	424	350	408	2925	2,1
43	194-1 СБ	"	2596–2605	"	2191	2325	2355	2643	19,0	17,1	22,0	3,97	413	348	393	4221	2,2
44	195 СБ	"	2658–2665	"	2198	2325	2341	2623	19,6	16,2	16,6	6,10	400	338	383	3294	2,1
45	195-1 СБ	"	2658–2665	"	2177	2314	2344	2639	20,0	17,5	17,3	3,71	438	352	422	3447	2,1
46	196 СБ	"	2658–2665	"	2194	2324	2363	2628	19,84	16,54	16,57	8,94	471	319	352	13222	2,3
47	196-1 СБ	"	2658–2665	"	2209	2336	2373	2628	19,76	16,02	16,08	5,29	466	299	337	16814	2,3
48	196-2 СБ	"	2658–2665	"	2197	2324	2361	2628	19,75	16,11	16,16	5,17	475	303	344	12035	2,2
49	197 СБ	"	2665–2672	"	2541	2578	2578	2664	6,5	6,0	6,2	0,19	269	217	265	5833	10,5
50	197-1 СБ	"	2665–2672	"	2556	2585	2590	2654	5,9	5,5	5,5	0,13	268	235	260	6992	11,9
51	198 СБ	"	2665–2672	"	2275	2378	2423	2622	15,2	13,2	14,2	12,83	394	324	390	7226	2,4
52	198-1 СБ	"	2665–2672	"	2270	2376	2395	2622	15,5	13,4	14,0	9,70	379	316	385	3897	2,4
53	199 СБ	"	2665–2672	"	2138	2281	2325	2624	21,65	18,36	18,24	5,82	445	309	356	20312	2,2
54	199-1 СБ	"	2665–2672	"	2172	2308	2350	2626	20,63	17,46	17,36	5,35	411	291	343	21317	2,1
55	200 СБ	"	2729–2733	"	2637	2661	2671	2721	4,7	3,1	3,3	0,23	294	229	290	2821	8,9
56	200-1 СБ	"	2729–2733	"	2638	2662	2672	2724	4,8	3,2	3,3	0,17	290	221	283	3489	9,4
57	217 ГМ	"	3442–3457	"	2573	2591	2650	2632	3,7	2,2	2,0	0,03	235	193	206	784	16,6
58	217-1 ГМ	"	3442–3457	"	2567	2589	2650	2641	3,9	2,8	2,6	0,06	211	202	213	983	14,1

Открытая пористость "по азоту" нетрадиционных коллекторов, которая определена с помощью насыщения цилиндрических образцов азотом под давлением 0,25 МПа, имеет несколько повышенные значения и изменяется от 6,6 до 38,1 % при среднем значении 25,7 %. Для традиционных коллекторов она изменяется от 1,5 до 25,9 % при среднем значении 12,9 %. Рост значений открытой пористости при насыщении азотом объясняется проникновением газа в капиллярные поры, в которые не может проникнуть жидкость.

Корреляционная зависимость между коэффициентами пористости пород, определенными методами гидро-статического взвешивания и газовольметрическим, имеет вид:  $k_{п,кер} = 0,9299 \cdot k_{п,азот} - 0,0111$ , при  $R^2 = 0,991$ , где  $k_{п,азот}$  – пористость, определенная насыщением азотом;  $k_{п,кер}$  – пористость определена насыщением керосином (рис. 1). Средняя относительная погрешность определения значений пористости составляла 1,22 %.

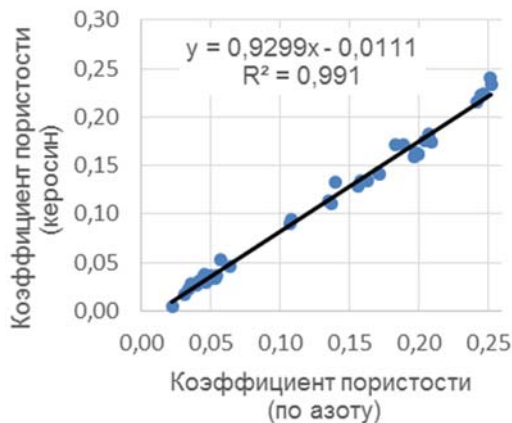


Рис. 1. Корреляционная зависимость между коэффициентами пористости пород, определенными методами газоволюметрическим и гидростатического взвешивания

**Проницаемость.** Свойство породы пропускать флюиды называется проницаемостью. Проницаемость породы зависит от ее эффективной пористости, то есть на нее влияют размер зерен породы, их форма, распределение зерен по размерам (сортировка) и их упаковка, а также степень консолидации и цементации. Тип глинистого или иного цементирующего материала между песчаными зернами также влияет на проницаемость, особенно в присутствии воды. Некоторые глинистые минералы, в частности смектит (бентониты) и монтмориллонит, разбухают в воде и могут частично или полностью закупоривать поровое пространство [3, 4].

Проницаемость  $k$  характеризует абсолютную проницаемость, если порода на 100 % насыщена одним флюидом (или фазой), таким как газ, нефть или вода. Если в породе присутствует более одного флюида, проницаемость для каждого из них характеризуется эффективной проницаемостью (при этом  $k_n$ ,  $k_g$ ,  $k_w$  – эффективные проницаемости для нефти, газа и воды соответственно). Во время движения по поровым каналам пластовые флюиды взаимодействуют между собой, мешая друг другу, поэтому сумма эффективной проницаемости всех трех фаз всегда меньше абсолютной проницаемости. Если в породе присутствует более одного флюида, отношение эффективной проницаемости любой фазы к абсолютной проницаемости породы называют относительной проницаемостью ( $k_r$ ) для этой фазы. Например, относительные проницаемости для нефти, газа и воды будут  $k_{rn} = k_n/k$ ,  $k_{rg} = k_g/k$ ,  $k_{rw} = k_w/k$  соответственно [14].

Нефтяные и газовые коллекторы могут иметь первичную проницаемость, которая известна также как проницаемость матрицы (минерального каркаса) породы, и вторичную проницаемость. Проницаемость матрицы образуется при отложении и литификации (консолидации) осадочных пород. Вторичная проницаемость является результатом изменения матрицы породы за счет уплотнения, цементации, образования трещин и выщелачивания. Уплотнение и цементация обычно уменьшают проницаемость, тогда как образование трещин и выщелачивание имеют тенденцию увеличивать их. В некоторых породах, особенно в низкопористых карбонатах и аргиллитах, именно за счет вторичной проницаемости происходит основная миграция флюидов.

Проницаемость пород-коллекторов нефти и газа может изменяться в диапазоне от 0,1 до 1000 фм<sup>2</sup> или более. Качество коллектора обусловлено его проницаемостью, которая делится на низкую –  $k < 1$  фм<sup>2</sup>; удовлетворительную –  $k = 1-10$  фм<sup>2</sup>; среднюю –  $k = 10-50$  фм<sup>2</sup>; высокую –  $k = 50-250$  фм<sup>2</sup>; очень высокую –  $k > 250$  фм<sup>2</sup> [6]. Коллекторы с проницаемостью ниже 1 фм<sup>2</sup>, считаются плотными. Такая низкая проницаемость обычно свойственна аргиллитам, алевролитам, плотным газоносным песчанникам, матрице известняков. Методы интенсификации – гидроразрыв и кислотная обработка пласта – повышают проницаемость пород и позволяют вести добычу из таких коллекторов, которые ранее считались некондиционными.

Коеффициент проницаемости образцов керна определялся методом стационарной фильтрации азота с помощью специально разработанной установки [2]. Выполнено два цикла измерений после экстрагирования образцов в хлороформе и спиртобензольной смеси. Средняя относительная погрешность определений коэффициента проницаемости составляла 2,6 %.

По результатам лабораторных измерений установлено, что значение коэффициента проницаемости пород традиционных коллекторов изменяются от 0,001 до 30,5 фм<sup>2</sup> при среднем значении 4 фм<sup>2</sup>. Проницаемость известняков низкая (0,001–0,45 фм<sup>2</sup>), в единичных случаях – удовлетворительная (1,25–4,61 фм<sup>2</sup>), песчаников и алевропесчанников – преимущественно удовлетворительная (1,72–9,7 фм<sup>2</sup>), иногда низкая (0,03–0,37 фм<sup>2</sup>) и высокая (12,83–30,55 фм<sup>2</sup>). Что касается проницаемости нетрадиционных коллекторов, то в силу хрупкости образцов аргиллитов удалось провести замеры только в единичных образцах, в которых проницаемость характеризуется значительным разбросом (от 0,001 до 18,74 фм<sup>2</sup>).

Для пород традиционных коллекторов установлена корреляционная зависимость (рис. 2) между коэффициентом пористости ( $k_n$ ) и коэффициентом проницаемости ( $k_{np}$ ), которая имеет вид: , при  $R^2 = 0,684$ .

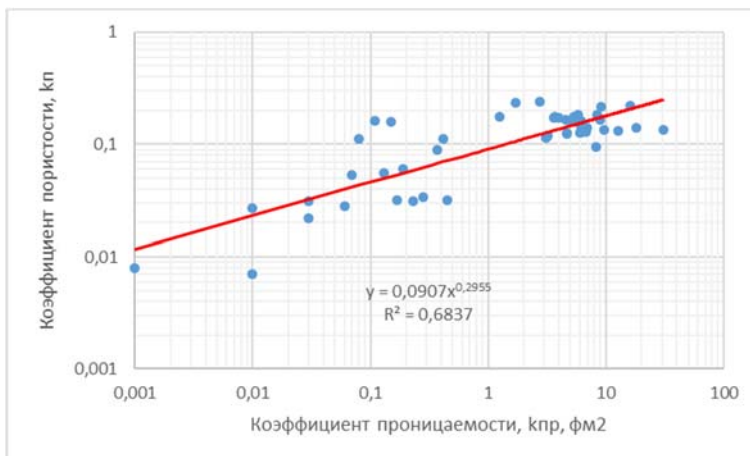


Рис. 2. Корреляционная зависимость между коэффициентом пористости ( $k_n$ ) и коэффициентом проницаемости ( $k_{np}$ )



**Удельное электрическое сопротивление.** Удельное электрическое сопротивление представляет собой важную характеристику породы. На величину этого параметра в горной породе влияет целый ряд факторов, обуславливающих изменение удельного сопротивления в широких пределах. Электрическое сопротивление вещества количественно оценивается величиной удельного электрического сопротивления (Ом·м), которое характеризует противодействие единицы объема вещества (горных пород, вод и т. д.) прохождению электрического тока. Удельное электрическое сопротивление определяется вещественным составом породы, минерализацией пластовых вод, температурой и давлением при которых измеряется эта величина [6, 11, 14, 15].

Лабораторные электрометрические измерения сухих образцов керна выполнены при температуре 20 °С с помощью цифрового тераомметра С.А 6547, который позволяет выполнять измерения электрического сопротивления в диапазоне от 10 кОм до 10 ТОм с цифровой записью на ЭВМ по специальной программе на постоянном токе по двухэлектродной схеме. Для измерения образцов, насыщенных раствором NaCl, применялся прецизионный цифровой RLC-метр МНС-1100, что позволяет выполнять измерения электрического сопротивления с повышенной точностью в диапазоне от  $10^{-6}$  до  $10^8$  Ом в диапазоне частот от 0 до 100 кГц. Цилиндрические образцы при измерении вставлялись в специальный кернодержатель с неполяризуемыми электродами [1, 12, 13, 18].

С целью установления зависимости петроэлектрических параметров от степени водонасыщенности пород традиционных коллекторов в процессе экспериментальных лабораторных исследований выполнялась серия электро-

метрических измерений, что позволило построить ряд корреляционных зависимостей между петрофизическими параметрами. Породы нетрадиционных коллекторов насыщались керосином (из-за разбухания глинистых разностей в воде и их разрушения), потому электрометрические измерения выполнены только на сухих образцах.

По результатам лабораторных измерений установлено, что удельное электрическое сопротивление сухих экстрагированных образцов пород нетрадиционных коллекторов меняется от 1243 до 107555 Ом·м при среднем значении 35560 Ом·м, а традиционных – от 372 до 95873 Ом·м при среднем значении 11220 Ом·м. При этом наблюдаются значительные вариации значений удельного сопротивления образцов, что объясняется неоднородностью текстуры пород (наличие глинистых и песчаных слоев). Удельное электрическое сопротивление образцов пород традиционных коллекторов, насыщенных моделью пластовой жидкости (раствор NaCl), меняется от 1,2 до 50,3 Ом·м при среднем значении 11,9 Ом·м, а параметр пористости – от 5,6 до 252 (среднее 53).

По материалам лабораторных исследований построена корреляционная зависимость (рис. 3) между коэффициентом пористости ( $k_n$ ) и параметром пористости (P) для пород традиционных коллекторов. Уравнение Арчи – Дахнова имеет вид:  $P = 1,1334 \cdot k_n^{-1,25}$ , при  $R^2 = 0,92$ .

Для традиционных коллекторов майкопской серии проведены исследования изменений удельного электрического сопротивления при отгонке воды на центрифуге ОС-6М (от 1000 до 6000 об/мин с шагом 1000 об/мин, давление вытеснения воды изменялось от 0,02 до 0,9 МПа). Установлены корреляционные зависимости параметра нефтегазонасыщения ( $P_n$ ) от коэффициента водонасыщения ( $k_b$ ) для ряда скважин (рис. 4) отдельных площадей.

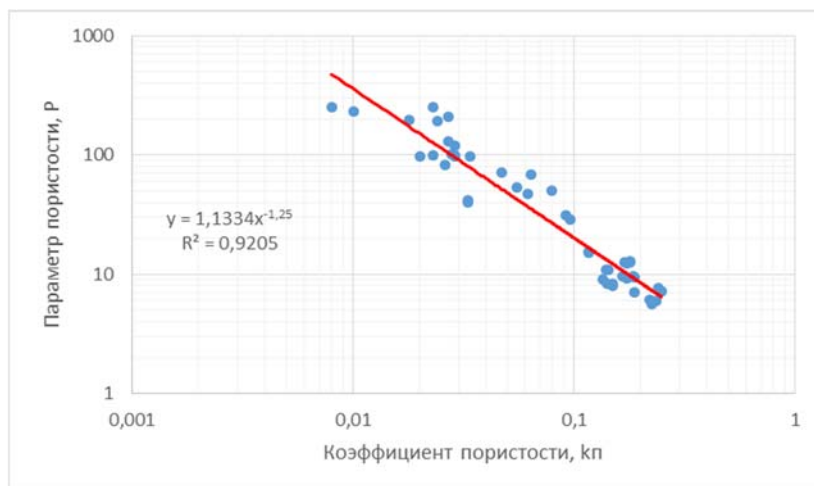


Рис. 3. Корреляционная зависимость между коэффициентом пористости ( $k_n$ ) и параметром пористости (P) – зависимость Арчи – Дахнова

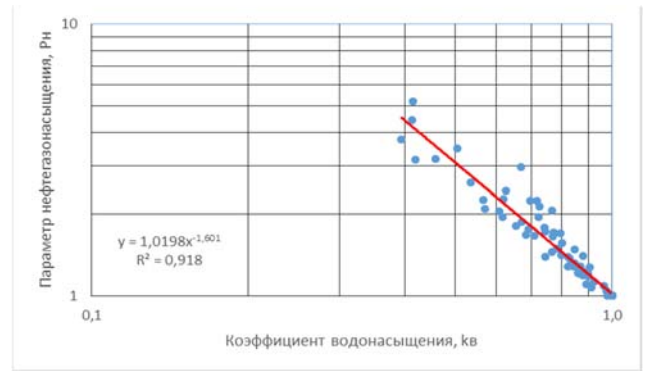
**Петроакустические исследования.** Скорости продольных упругих волн определялись на лабораторных образцах с помощью цифровой ультразвуковой установки "Керн-4". Для исследования скоростей распространения упругих волн в горных породах применен импульсно-фазовый ультразвуковой метод [17]. Измерение скорости продольных волн осуществлялось на образцах, которые были ориентированы вдоль слоистости. При контрольных измерениях было установлено, что относительная погрешность измерений не превышает 2–3 % для продольных волн.

Ультразвуковые исследования образцов проведены после экстрагирования на сухих образцах и при полном

их насыщении керосином и раствором NaCl. Интервальное время, определенное для сухих экстрагированных образцов пород нетрадиционных коллекторов, изменяется от 192 до 482 мкс/м (среднее 361 мкс/м), а традиционных – от 170 до 475 мкс/м (среднее 313 мкс/м). Для насыщенных керосином образцов пород нетрадиционных коллекторов этот параметр варьируется в диапазоне от 181 до 407 мкс/м (среднее 318 мкс/м), а традиционных – от 165 до 401 мкс/м (среднее 256 мкс/м). При насыщении образцов пород традиционных коллекторов раствором NaCl интервальное время меняется от 165 до 422 мкс/м (среднее 287 мкс/м).



Скв. Субботина-1.,  $P_n = 1,0388 \cdot k_b^{-1.29}$ , при  $R^2 = 0,9$



Скв. Субботина-403.  $P_n = 1,0198 \cdot k_b^{-1.601}$ , при  $R^2 = 0,92$



Скв. Матроская-1.  $P_n = 1,0388 \cdot k_b^{-1.228}$ , при  $R^2 = 0,75$



Скв. Шмидта-11.  $P_n = 0,9665 \cdot k_b^{-2.09}$  при  $R^2 = 0,835$



Скв. Шмидта-9.  $P_n = 1,0339 \cdot k_b^{-2.04}$ , при  $R^2 = 0,762$

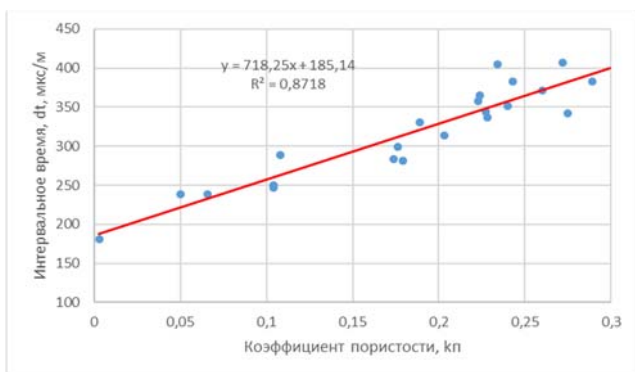


Скв. Гамбургцева-2.  $P_n = 1,0392 \cdot k_b^{-1.852}$ , при  $R^2 = 0,682$

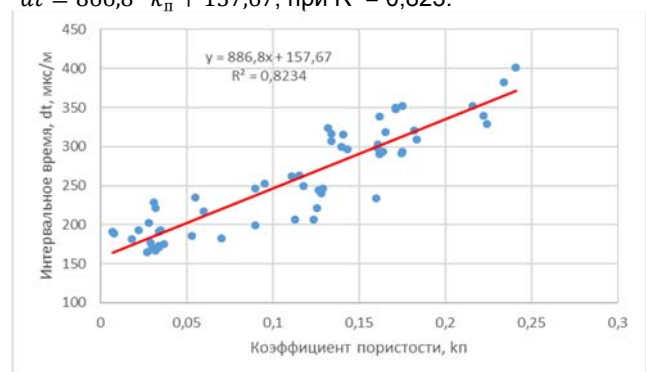
Рис. 4. Корреляционные зависимости между коэффициентом водонасыщения ( $k_b$ ) и параметром нефтегазонасыщения ( $P_n$ ) традиционных коллекторов майкопской серии

Установлены корреляционные связи между интервальным временем ( $dt$ ) и коэффициентом пористости ( $k_p$ ) исследованных пород. Для примера, на рис. 5 приводятся корреляционные связи интервального времени

и коэффициента пористости для насыщенных керосином образцов, которые имеют вид: а) для пород нетрадиционных коллекторов –  $dt = 718,25 \cdot k_p + 185,14$ , при  $R^2 = 0,872$ ; б) для пород традиционных коллекторов –  $dt = 866,8 \cdot k_p + 157,67$ , при  $R^2 = 0,823$ .



а



б

Рис. 5. Корреляционная зависимость между интервальным временем и коэффициентом пористости для нетрадиционных (а) и традиционных (б) пород-коллекторов

**Выводы.** Проведена оценка петрофизических параметров традиционных и нетрадиционных пород-коллекторов майкопской серии Азовско-Черноморского региона: объемной плотности, кажущейся минералогической плотности, открытой пористости, проницаемости, петроэлектрических и акустических параметров. Изучены петрофизические свойства 42 образцов керн глинистых пород майкопской серии северо-западного шельфа Черного моря (скв. Архангельская-1, Голицына-1, 6, 7, 9, 12, Шмидта-6, 9, 11, Гамбурцева-2), центральной части Крымского полуострова (скв. Джанкойская-1); Керченского полуострова (скв. Фонтановская-6, 12); Прикерченского шельфа Азовского моря (скв. Северо-Казантипская-3); северного шельфа Азовского моря (скв. Матросская-1), Прикерченской части шельфа Черного моря (скв. Субботина-1, 403), а также 58 образцов керн традиционных коллекторов (преимущественно известняки и песчаники) СЗ шельфа Черного моря (скв. Шмидта-6, 9, 11, Гамбурцева-2); северного шельфа Азовского моря (скв. Матросская-1); Прикерченской части шельфа Черного моря (скв. Субботина-403).

Майкопские образования Черноморско-Каспийского региона входят в состав мощного (более 1000 м) высокоперспективного нефтегазоносного комплекса, который представлен глинистыми толщами с прослоями песчаников и алевролитов. С ним связан ряд газовых месторождений (Голицынское, Южноголицынское, Шмидта, Архангельское, Крымское, Джанкойское, Стрелковое и др.), в которых коллекторами является горизонты песчаников и алевролитов эффективной мощностью 0,5 – 7,0 м.

Нетрадиционные коллекторы (глины, аргиллиты) характеризуются значительными колебаниями петрофизических параметров, что, очевидно, связано с составом и трещиноватостью образцов. Так, объемная плотность сухих образцов глинистых пород майкопской серии изменяется от 1313 до 2621 кг/м<sup>3</sup> (средняя 1760 кг/м<sup>3</sup>), при насыщении образцов керосином – от 1728 до 2708 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2081 кг/м<sup>3</sup>), а кажущаяся минералогическая плотность – от 2434 до 3022 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2584 кг/м<sup>3</sup>). Значение открытой пористости для глинистых пород майкопской серии варьируется в диапазоне от 0,3 до 31,7 % при среднем значении 19,6 %. Открытая пористость "по азоту" нетрадиционных коллекторов изменяется от 6,6 до 38,1 % при среднем значении 25,7 %.

Что касается традиционных пород-коллекторов майкопской серии (песчаники, известняки, алевролиты), то они характеризуются высокими емкостно-фильтрационными свойствами. Объемная плотность сухих образцов песчаников и известняков майкопской серии изменяется от 1986 до 2638 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2341 кг/м<sup>3</sup>), при насыщении образцов керосином – от 2175 до 2662 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2647 кг/м<sup>3</sup>), кажущаяся минералогическая плотность – от 2474 до 2724 кг/м<sup>3</sup> (средняя 2630 кг/м<sup>3</sup>). Значение открытой пористости при насыщении образцов керн керосином варьируется в диапазоне от 0,7 до 24,1 % при среднем значении 11,0 %, при насыщении образцов керн моделью пластовой воды (раствор NaCl), изменяются от 0,8 до 25,0 % при среднем значении 11,3 %, а открытая пористость "по азоту" – от 1,5 до 25,9 % при среднем значении 12,9 %.

В результате анализа материалов лабораторных петроэлектрических исследований построен ряд корреляционных зависимостей: коэффициента пористости от параметра пористости (уравнение Арчи – Дахнова) и параметра нефтегазонасыщения от коэффициента водо-насыщения. В результате анализа петроакустических материалов построены корреляционные зависимости коэффициента пористости от интервального времени образцов, насыщенных керосином.

Следует отметить, что породы нетрадиционных коллекторов (глины, аргиллиты), как правило, имеют пониженные прочностные параметры. Вследствие этого необходимо усовершенствовать технологию лабораторных петрофизических исследований путем разработки новых лабораторных установок с учетом этих особенностей пород.

#### Список использованных источников

1. Вижва С.А. Петроэлектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелінського газоконденсатного родовища / С.А. Вижва, Д.І. Онищук, В.І. Онищук // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2012. – № 57. – С. 13–16.
2. ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. – М. : Мингео СССР, 1985. – 18 с.
3. Григорчук К. Літологія і седиментогенез майкопських відкладів Каркінітсько-Північнокримського прогину. Ст. 1. Літологічні комплекси і седиментаційна циклічність майкопських відкладів / К. Григорчук, В. Гнідець, Л. Баландюк // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2009. – № 1 (146). – С. 69–78.
4. Григорчук К. Літологія і седиментогенез майкопських відкладів Каркінітсько-Північнокримського прогину. Ст. 2. Ранній майкоп. Геологічна палеоокеанографія та седиментогенез / К. Григорчук, В. Гнідець, Л. Баландюк // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2009. – № 2 (147). – С. 71–83.
5. ГСТУ 41-00032626-00-025-2000. Коефіцієнт залишкового водонасичення гірських порід. – К. : Мінекоресурсів України, 2001. – 17 с.
6. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород / В.Н. Дахнов. – М. : Недра, 1975. – 343 с.
7. Ключина Г.В. Літологічні особливості уламкових порід майкопської серії північно-західного шельфу Чорного моря / Г.В. Ключина // Літологія, геологія морів та океанів : зб. наук. праць ІГН. – 2009. – № 2 (83).
8. Надежкин Д.В. Нефтематеринские свойства майкопских отложений и их роль в нефтегазоносности восточной части Черного моря : автореф. дис... канд. геол.-мин. наук: 25.00.12 / Д.В. Надежкин. – М., 2011. – 25 с.
9. Науменко А.Д., Новые черты геологического строения керлеутских (майкопских) отложений Керченского сегмента Азовского и Черного морей / А.Д. Науменко, М.А. Науменко, П.М. Коржнев // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2010. – № 4. – С. 40–49.
10. Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Кн. III. Південний нафтогазоносний регіон / В.А. Михайлов, І.М. Куровець, Ю.Н. Синьковський та ін. – К. : ВПЦ "Київський університет", 2014. – 222 с.
11. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород / Э.И. Пархоменко. – М. : Наука, 1965. – 164 с.
12. Петроэлектричні дослідження керн свердловини Чорноморського шельфу / С.А. Вижва, М.В. Рева, А.П. Гожик, В.І. Онищук, І.І. Онищук // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2008. – № 44 – С. 4-8.
13. Петроэлектричні дослідження керн складнобудованих порід-колекторів / С.А. Вижва, М.В. Рева, А.П. Гожик, В.І. Онищук, І.І. Онищук // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2010. – № 50. – С. 4–7.
14. Петрофизика. Справочник. Ч. 1 / под ред. Н.Б. Дортман. – М. : Недра, 1992. – 391 с.
15. Петрофизика. Справочник. Ч. 2 / под ред. Н.Б. Дортман. – М. : Недра, 1992. – 304 с.
16. Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону / С.А. Вижва, В.А. Михайлов, Д.І. Онищук, І.І. Онищук // Геоінформатика. – 2013. – № 3 (47). – С. 1–9.
17. Продайвода Г.Т. Акустика текстур гірських порід / Г.Т. Продайвода. – К. : ВГЛ "Обрії", 2004. – 144 с.
18. Vyzhva S. Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyrskva area in Volyno-Podillia (Ukraine) / S. Vyzhva, V. Onyshchuk, D. Onyshchuk // NAFTA-GAZ – 2017. – Rok LXXIII. – 2017. – № 2 – С. 90–96.
19. Vyzhva S.A. Implications for Unconventional Hydrocarbons Exploration and Production in Ukraine / S.A. Vyzhva, V.A. Mikhailov // 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers, 2013, P. 4927–4931.

#### Reference

1. Vyzhva, S.A., Onyshchuk, D.I., Onyshchuk, V.I. (2012). Petroelectric model of reservoir rocks of the West Shebelinka gas field. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 57, 13–16. [In Ukrainian].
2. GOST 26450.2-85. The rocks. Methods for determination of collector properties. Method for determination of absolute permeability coefficient under stationary and non-stationary filtration. (1985). Moscow: Mingeo USSR. [In Russian].
3. Grigorчук, K. Hnidets, V., Balandyuk, L. (2009). Lithology and sedimentogenesis of Maikop deposits of Karkinitzky-Nord Crimea deflection. Art. 1. Lithological complexes and sedimentation cyclicity of Maikop deposits. *Geology and Geochemistry of Fossil Energy Raw Materials*, 1 (146), 69–78. [In Ukrainian].
4. Grigorчук, K. Hnidets, V., Balandyuk, L. (2009). Lithology and sedimentogenesis of Maikop deposits of Karkinitzky-Nord Crimea deflection.

Art. 2. Early Maikop. Geological and paleoceanography sedimentolithohenez. *Geology and Geochemistry of Fossil Energy Raw Materials*, 2 (147), 71–83. [In Ukrainian].

5. GSTU 41-00032626-00-025-2000. Coefficient of residual water saturation of rocks. (2001). Kyiv: Ukraine Ministry of Ecology. [In Ukrainian].

6. Dakhnov, V.N. (1975). Geophysical methods for the determination of reservoir properties and oil and gas saturation of rocks. Moscow: Nedra, 343 p. [In Russian].

7. Klyushyna, G.V. (2009). Lithological features of the clastic rocks of Maikop series of northwestern Black Sea shelf. *Lithology, geology seas and oceans. Coll. Science. IGN works*, 2 (83). [In Ukrainian].

8. Nadezhkin, D.V. (2011). Oil source properties of Maikop and their role in the oil and gas potential of the eastern Black Sea: *Extended abstract Doctor's thesis Theses (Geological and Mineralogical Sciences)*. Moscow: MSU Library, 25 p. [In Russian].

9. Naumenko, A.D., Naumenko, M.A., Korzhnev, P.M. (2010). New features of the geological structure kerleutsky (Maikop) deposits of the Kerch segment of the Azov and Black Seas. *Geology and mineral resources of the oceans*, 4, 40–49. [In Russian].

10. Mykhailov, V.A., Kurovets, I.M., Synkovskyy, Ju.N. et al. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine. Book. III. South oil and gas region. Kyiv: Kyiv University Publishing, 222 p. [In Ukrainian].

11. Parkhomenko, E.I. (1965). Electrical properties of rocks. Moscow: Nauka, 164p. [In Russian].

12. Vyzhva, S.A., Reva, M.V., Hozhyk, A.P., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, I.I. (2008). Petroelectrical investigation of core hole of the Black

Sea shelf. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 44. 4–8. [In Ukrainian].

13. Vyzhva, S.A., Reva, M.V., Hozhyk, A.P., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, I.I. Petroelectrical investigation of core of complex-structured reservoir rocks. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 50, 4–7. [In Ukrainian].

14. Dortman, N. B. (Ed.). (1992). Petrophysics. Handbook (Vol. 1). Moscow: Nedra, 391 p. [In Russian].

15. Dortman, N. B. (Ed.). (1992). Petrophysics. Handbook (Vol. 2). Moscow: Nedra, 304 p. [In Russian].

16. Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onyshchuk, D.I., Onyshchuk, I.I. (2013). Petrophysical parameters of unconventional reservoir rocks southern oil and gas region. *Geoinformatics*, 3 (47), 1–9. [In Ukrainian].

17. Prodayvoda, G.T. (2004). Acoustics textures of rocks. Kyiv: Horizons, 144 p. [In Ukrainian].

18. Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, D. (2017). Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyrska area in Volyno-Podillia (Ukraine). *NAFTA-GAZ – 2017. Rok LXXIII*, 2, 90–96.

19. Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A. (2013). Implications for unconventional hydrocarbons exploration and production in Ukraine. *75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers*, 4927–4931. [In English].

Надійшла до редколегії 04.09.17

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

E-mail: vsa@univ.net.ua,

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

E-mail: vladvam@gmail.com,

I. Onyshchuk, Cand. Sci (Geol.), Senior Research

E-mail: oivan1@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv

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

## PETROPHYSICAL FEATURES OF MAIKOP SERIES OF THE CRIMEAN-BLACK SEA REGION

*The purpose of the article is to assess the petrophysical properties of reservoir rocks of traditional and non-traditional sources of hydrocarbons in the Maikop series of the Crimean-Black Sea region. The article is based on our own experimental investigations conducted on the basis of the petrophysical laboratory of the Institute of Geology of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Petrophysical properties of the clay rocks of the Maikop series in NW part of the Black Sea shelf; the central part of the Crimean Peninsula; Kerch Peninsula; Kerch shelf of the Azov Sea; the northern section of the Azov Sea shelf; Near Kerch section of the Black Sea shelf, as well as traditional collectors (mainly limestone and sandstone) of NW part of the Black Sea shelf; the northern section of the Azov Sea shelf; Near Kerch section of the Black Sea shelf were studied. For the first time, a complex characterization of petrophysical properties of non-traditional clay reservoirs of the Maikop series is given, and their comparison with the petrophysical characteristics of traditional reservoirs is made.*

*Unconventional reservoirs (clays, mudstones) are characterized by significant fluctuations of petrophysical parameters. That is clearly associated with varying degrees of sample jointing. Thus, the bulk density of argillaceous rocks of the Maikop series varies from 1313 to 2621 kg/m<sup>3</sup> (average 1760 kg/m<sup>3</sup>) in dry samples, from 1728 to 2708 kg/m<sup>3</sup> (average 2081 kg/m<sup>3</sup>) in samples saturated with kerosene and the apparent mineralogical density range – from 2434 to 3022 kg/m<sup>3</sup> (average 2584 kg/m<sup>3</sup>). The coefficient of open porosity varies from 0,3 % to 31,7 % (average 19,6 %). Open porosity on nitrogen varies from 6,6 % to 38,1 % (average 25,7 %).*

*Traditional reservoir rocks (sandstone, limestone) are characterized by high capacitive-filtration properties. Bulk density of sandstones and limestones of the Maikop series changes from 1986 to 2638 kg/m<sup>3</sup> (average 2341 kg/m<sup>3</sup>) in dry samples, from 2175 to 2662 kg/m<sup>3</sup> (average 2647 kg/m<sup>3</sup>) in samples saturated with kerosene. The apparent mineralogical density varies from 2474 to 2724 kg/m<sup>3</sup> (average 2630 kg/m<sup>3</sup>). Open porosity varies from 0,7 % to 24,1 % (average 11,0 %) in core samples saturation by kerosene and from 0,8 % to 25,0 % (average 11,3 %) in core samples saturated with model layers solution (as NaCl). Open porosity on "nitrogen" varies from 1,5 % to 25,9 % (average 12,9 %).*

**Keywords:** Maikop series, petrophysical properties, conventional and unconventional reservoirs.

C. Вижва, д-р геол. наук, проф.

E-mail: vsa@univ.net.ua,

V. Михайлов, д-р геол. наук, проф.

E-mail: vladvam@gmail.com,

I. Онищук, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.

E-mail: oivan1@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

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

## ПЕТРОФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПОРІД МАЙКОПСЬКОЇ СЕРІЇ КРИМСЬКО-ЧОРНОМОРСЬКОГО РЕГІОНУ

*Метою статті є оцінка петрофізичних параметрів порід-колекторів традиційних і нетрадиційних джерел вуглеводнів майкопської серії Кримсько-Чорноморського регіону. Стаття ґрунтується на власних експериментальних дослідженнях, проведених на базі петрофізичної лабораторії ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Вивчено петрофізичні властивості глинистих порід майкопської серії північно-західної частини шельфу Чорного моря, центральної частини Кримського півострова; Керченського півострова; Прикерченської частини шельфу Азовського моря; північної частини шельфу Азовського моря, Прикерченської частини шельфу Чорного моря, а також традиційних колекторів (переважно вапняки і пісковики) північно-західної частини шельфу Чорного моря; північної частини шельфу Азовського моря; Прикерченської частини шельфу Чорного моря. Вперше дана комплексна характеристика петрофізичних параметрів нетрадиційних глинистих колекторів майкопської серії, проведено їх зіставлення з петрофізичними характеристиками традиційних колекторів.*

*Нетрадиційні колектори (глини, аргіліти) характеризуються значними коливаннями петрофізичних параметрів, що, очевидно, пов'язано з різним ступенем тріщинуватості зразків. Так, об'ємна густина сухих зразків глинистих порід майкопської серії змінюється від 1313 до 2621 кг/м<sup>3</sup> (середня 1760 кг/м<sup>3</sup>), при насиченні зразків газом – від 1728 до 2708 кг/м<sup>3</sup> (середня 2081 кг/м<sup>3</sup>), а позірні мінералогічна густина – від 2434 до 3022 кг/м<sup>3</sup> (середня 2584 кг/м<sup>3</sup>). Значення відкритої пористості змінюються від 0,3 до 31,7 % (середня 19,6 %). Відкрита пористість "по азоту" варіюється від 6,6 до 38,1 % (середня 25,7 %).*

*Традиційні породи-колектори (пісковики, вапняки) характеризуються високими ємнісно-фільтраційними властивостями. Густина сухих зразків пісковиків і вапняків майкопської серії змінюється від 1986 до 2638 кг/м<sup>3</sup> (середня 2341 кг/м<sup>3</sup>), при насиченні зразків газом – від 2175 до 2662 кг/м<sup>3</sup> (середня 2647 кг/м<sup>3</sup>), позірні мінералогічна густина – від 2474 до 2724 кг/м<sup>3</sup> (середня 2630 кг/м<sup>3</sup>). Значення відкритої пористості при насиченні зразків керном газом варіюються від 0,7 до 24,1 % (середня 11,0 %), при насиченні зразків моделлю пластового розчину (по NaCl) – від 0,8 до 25,0 % (середня 11,3 %), а відкрита пористість "по азоту" змінюється від 1,5 до 25,9 % (середня 12,9 %).*

**Ключові слова:** майкопська серія, петрофізичні властивості, традиційні і нетрадиційні колектори.

УДК 550.382

M. Orlyuk, Dr. Sci. (Geol.)  
 Chief of the Geomagnetism Department  
 E-mail: orlyuk@igph.kiev.ua,  
 A. Marchenko, Junior researcher  
 E-mail: andrey\_marchenko@ukr.net,  
 M. Bakarjieva, Senior researcher  
 E-mail: bakarjieva@ukr.net  
 Subbotin Institute of Geophysics  
 National Academy of Sciences of Ukraine  
 Acad. Palladina Ave. 32, Kyiv, 03680, Ukraine

### 3D MAGNETIC MODEL OF THE EARTH CRUST OF THE EASTERN EUROPEAN CRATON WITH THE ACCOUNT OF THE EARTH SPHERICITY AND ITS TECTONIC INTERPRETATION

*(Рекомендовано членами редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Іванік і д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)*

*The geomagnetic field is widely used to obtain information on the deep structure and development of the Earth's lithosphere, small-scale forecasting of minerals, and the solution of a number of environmental problems. The most significant results are obtained due to the development of 2D, 3D and 4D magnetic models of the Earth's crust (lithosphere) in which the spatial and spatiotemporal distribution of magnetic sources is reflected. The reliability of the spatiotemporal distribution (location) of magnetic sources and the magnitudes of their magnetization depends on the adequacy of taking into account the geometry of objects and the inhomogeneity of the Earth's main magnetic field. In this regard, for the East European Craton for the first time its regional 3D magnetic model for a spherical Earth is developed. To develop the model, we used digital data WDMAM at a height of 5 km, a priori data on the depths of the surface of the crystalline basement and Moho, the temperature distribution, as well as the results of other geological and geophysics researches. According to S.V. Bogdanova, the Eastern European Craton was formed due to the saturation of three segments (Fennoscandia, Volgo-Uralia and Sarmatia) in a time interval of 2,1–1,8 Ga. At the Phanerozoic stage of development, the modern borders of the craton were formed. It is established that a non-uniform distribution of magnetic sources and magnitudes of their magnetization is observed on the boundaries of the craton. The maximum concentration of magnetic sources is characteristic for the edge parts of the craton. The southwestern boundary of the craton is marked by magnetic sources with a magnetization of (1,0–3,0) A/m at depths of (10–18±46) km. Stretching of the sources is consistent with the stretch of the Trans-European sutural zone and the Baltic-Transnistrian zone of pericratonic troughs (subsidence). The stretching of magnetic sources in the southeast of the craton within Fennoscandia and the Volgo-Uralia is coordinated with the strike of the Phanerozoic structures of the Ural and Timan. Magnetic sources lie in the interval (10–18±38–44) km and have a magnetization of (0,7–4,0) A / m. Magnetic sources of the northern (within Fennoscandia) and southern (within Sarmatia) parts of the craton have an end joint with its boundary. The zones of articulation of the EEC segments are also distinguished by sources of regional magnetic anomalies. Magnetic sources of the Central-Russian rift system divide the magnetic crust of the Volgo-Uralia and the weak magnetic crust of Fennoscandia, and the sources of the Volyn-Orsha rift system are Fennoscandia and Sarmatia. Magnetic sources of the Pachelma rift zone are separated by Sarmatia and Volgo-Uralia. We note that approximately the same strike has magnetic anomalies of the Kursk-Bryansk band with maximal values of the magnetization of their sources within the limits of the craton (>10,0 A/m). According to the concept of tectonics of lithospheric plates, the magnetic inhomogeneity of the zones of saturation of the segments of the craton and its outer boundaries can be considered as sources of subduction type, which arose at the stage of their formation. In the Riphean and Phanerozoic stages of the development of the lithosphere within the zones of saturation of the segments of the craton and its outer boundaries, magnetic sources of rift nature were formed. Magnetic sources of subduction-reduction and rifting types are characterized by a corresponding metallogenic specialization, therefore the developed model can be used both for tectonic constructions and for small-scale forecasting of minerals.*

**Keywords:** East European Craton, 3D magnetic model.

**Introduction.** The development of three-dimensional magnetic models of the Earth's lithosphere is an integral component to reveal a sources allocation through its section, as well as geological coordination of the results of surface, aerial, stratospheric and satellite magnetic surveys. To obtain the real sources shape and the values of their magnetization from the results of magnetic modeling for large areas, it is necessary to take into account the sphericity of the Earth. In this paper, the task was to develop three-dimensional magnetic model of the territory of the East European Craton (EEC) taking into account the sphericity of the Earth in order to clarify the Earth's crust deep structure.

**Data and methods.** To date, small-scale magnetic models and magnetization distribution patterns in the lithosphere of EEC have been developed [8, 12, 13, 28 et al.]. For a number of DSS profiles within the Craton as well as its individual parts, magnetic models in the 2- or 3-dimensional variant are constructed in the Cartesian coordinate system [9, 18, 20 et al.].

Within a reasonable compromise between the size of the territory and the detailed studies for the EEC, a scale model of 1 : 5 000 000 was developed, with the detailing of its south-western part.

To create the initial approximation of the three-dimensional magnetic model of the Earth's crust of the East

European Craton, the following data were used: World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) at an altitude of 5 km, heat flow distribution data; temperature at the Moho boundary; scheme of distribution of the foundation surface, Moho, as well as other geological and geophysical data [7, 13, 19, 21, 22, 24, 25].

As shown by the experience of previous studies on the construction of the scheme of the deep structure of the EEC [8, 13, 14, 17, etc.], in the anomalous magnetic field there is a regional component, the sources of which belong to the lower floor of the Earth's crust. An anomalous magnetic field map [15] was constructed for the analysis of an anomalous magnetic field and the development of a magnetic model of the Earth's crust of the territory of the EEC, using a digital array of WDMAM [25]. Taking into account the scale of the map, one can take an abnormal magnetic field  $\Delta B$  for the first approximation of its regional component  $\Delta B_{a,reg}$ , naturally complicated by high-intensity anomalies of local character. An anomaly of the magnetic field was obtained by averaging the original field with a pallet (window) 50x50 km (for the Kursk magnetic anomaly region -100x100 km). These anomalies are considered as regional and they were used for magnetic modeling. For the territory of Ukraine, a map of the anomalous field  $\Delta B_a$  of 1 : 500,000 scale was used as a basis [5, 10]. As for the EEC area, the regional

component was obtained by averaging the data with a window 50x50 km. Thus, 94 regional magnetic anomalies (RMAs) are allocated within the EEC, the sources of which in the model are represented by one and several magnetic blocks.

The magnetoactive layer of the Earth's crust extends to the depths where the Curie temperature of magnetite 580 °C, the main magnetic mineral of the crystalline part of the Earth's crust, is reached. Given the "cold" regime of the lithosphere for a large part of the territory of the EEC [21], the lower limit of this layer may be Moho surface, as a petrological boundary. The upper edge of deep sources in most cases refers to the roof of the diorite layer of the Earth's crust. For the territory of the craton, the depth to this boundary is (8–15) km. Exceptions are the Dnieper-Donetsk avlakogen and the Caspian depression, where the depth of immersion of the crystalline basement reaches 20 km.

The direction of the total magnetization vector as a result of its equilibrium state in the deep parts of the crust corresponds to the direction of the total geomagnetic field strength vector.

Consideration of the spatial inhomogeneity of the main (normal) magnetic field of the Earth  $B_{IGRF}$  and the relationship between the components of the induction vector for different parts of the investigated region are important when developing magnetic models of large regions [15]. As shown in [15] for the area of research in the 2005 epoch, the modulus of induction of the main magnetic field varies within the limits of 45000÷57400 nanotesla, and the declination and inclination angle is  $D_{IGRF} = 1^{\circ}\div 19^{\circ}$  and  $I_{IGRF} = 62^{\circ}\div 79^{\circ}$  respectively. Naturally, ignoring this can lead to errors both in estimating the magnetization of the sources of the Earth's crust and in their spatial position. The possibility of taking this feature into account is realized in software and algorithmic support of the solution of the direct magneto-prospecting problem for a spherical Earth [4, 6].

**Results and discussion.** The East European craton has an area of 6,7 square km, including the shelves. Within the EEC, the Precambrian crystalline crust is represented in the Baltic and Ukrainian shields, as well as in certain areas of Belarus and the Voronezh crystal massif. The rest of the craton is covered with Late Proterozoic and Phanerozoic sedimentary cover.

The EEC consists of three segments: Fennoscandia, Volgo-Uralia and Sarmatia, which differ in tectonic regime and age of the crust, which have united in the interval of 2,1–1,9 Ga. The processes of activation of the craton were reduced to the formation of Riphean rifts in the zones of saturation of segments and its marginal parts [22, 27].

The Fennoscandian segment occupies the northern, northwestern part of the craton. Eastern Fennoscandia, like the Volgo-Uralia, is characterized by the crustal age of 3,8–2,6 Ga, the western part of the segment has a paleoproterozoic crust of 1,95–1,65 Ga. The thickness of the Earth's crust segment is from 30 km to 58 km.

Along the northeastern border, the Riphean and Vendian Timan strata were thrust to Fennoscandia. This is well emphasized by the sources located along the boundary, which differ sharply from their mosaic character in the inner part of the segment (see Fig. 1). Marginal sources with a magnetization of (0,5÷1,5) A/m are confined to the elevation of M-surface up to 34 km [24]. It should be noted the south-west fall of the lateral faces of the sources.

Approximately the same ratio of magnetic sources is typical for the northwestern boundary of the segment, hidden under the overturned caledonides of northern Scandinavia. Magnetic sources have magnetization mainly from 1,0 A/m to 2,5 A/m and are located at depths from 10–12 km to 42–44 km.

The south-western boundary of the segment is traced along the line of the Trans-European suture zone. It delineates the ancient EEC and the Epipaleozoic West European platform. According to seismic data, the boundary is reflected by the vertical displacement of the M section by about 10 km, and the thickness of the sedimentary layer increased to (10–12) km [23]. In the magnetic model, the boundary is represented by a chain of the sources along it with a magnetization of 1–3 A/m and the depths from (10–18) km to 46 km. In accordance with [17], this area is associated with the Baltic-Transnistrian zone of pericratonic subsidences.

Along 30°–31° east longitude magnetic sources form the Pecheneg-Ladoga belt of the submeridional direction, considered as a suture zone of repeated activation [16]. Within the zone, sources with a magnetization of 0,9–2,1 A/m are located at depths of 8–10 km ÷ 40–42 km.

The Volgo-Ural segment is represented mainly by the Archean crust, which is completely buried under the Phanerozoic sedimentary cover. However, under it there are numerous Meso-Neoproterozoic avlakogenes and basins, filled with sedimentary rocks with a thickness of (2–10) km. The average thickness of the Earth's crust is about 40 km. In the magnetic model, its central part is characterized by an unordered mosaic nature of sources distribution with location depths from 10–18 km to 38–44 km and the magnetization of 0,7–1,5 A/m. These sources can, presumably, be connected with the system of stable Archean dome-like structures (Fig. 1) [1], whereas linear ones belong to the mobile belts of the Paleoproterozoic [22].

In the east, the Volgo-Ural segment is limited by the hercinides of the Urals, which are thrust to the craton. In this part of the segment there are intense magnetic sources (up to 4,0 A/m), the strike of which partially corresponds to the strike of its boundary. Further to the southeast, a zone of magnetic bodies also confined to the edge of the segment is clearly distinguished.

The Sarmatian segment is characterized by an average crustal thickness of 48 km and a strongly magnetized lithosphere [17].

The magnetization of the lower part of the crust, as it has been shown by the results of modeling, is much higher in comparison with the sources of the Volgo-Uralia and Fennoscandia. The spatial orientation of sources within Sarmatia varies in different ways with the extent of both the boundaries of the craton and the large tectonic units of the segment. The south-western, north-western and northeastern boundaries of the segment are characterized by magnetic sources of consonant strike. For the southern edge of the craton, the end joint of magnetic bodies with its boundary is characteristic. High values of magnetization are sources of Lviv (3,2 A/m), Odessa (3,5 A/m) and West Ingulets (3,6 A/m) RMA. Especially it is worth to note Kursk RMA with the source magnetization up to 10,0 A/m.

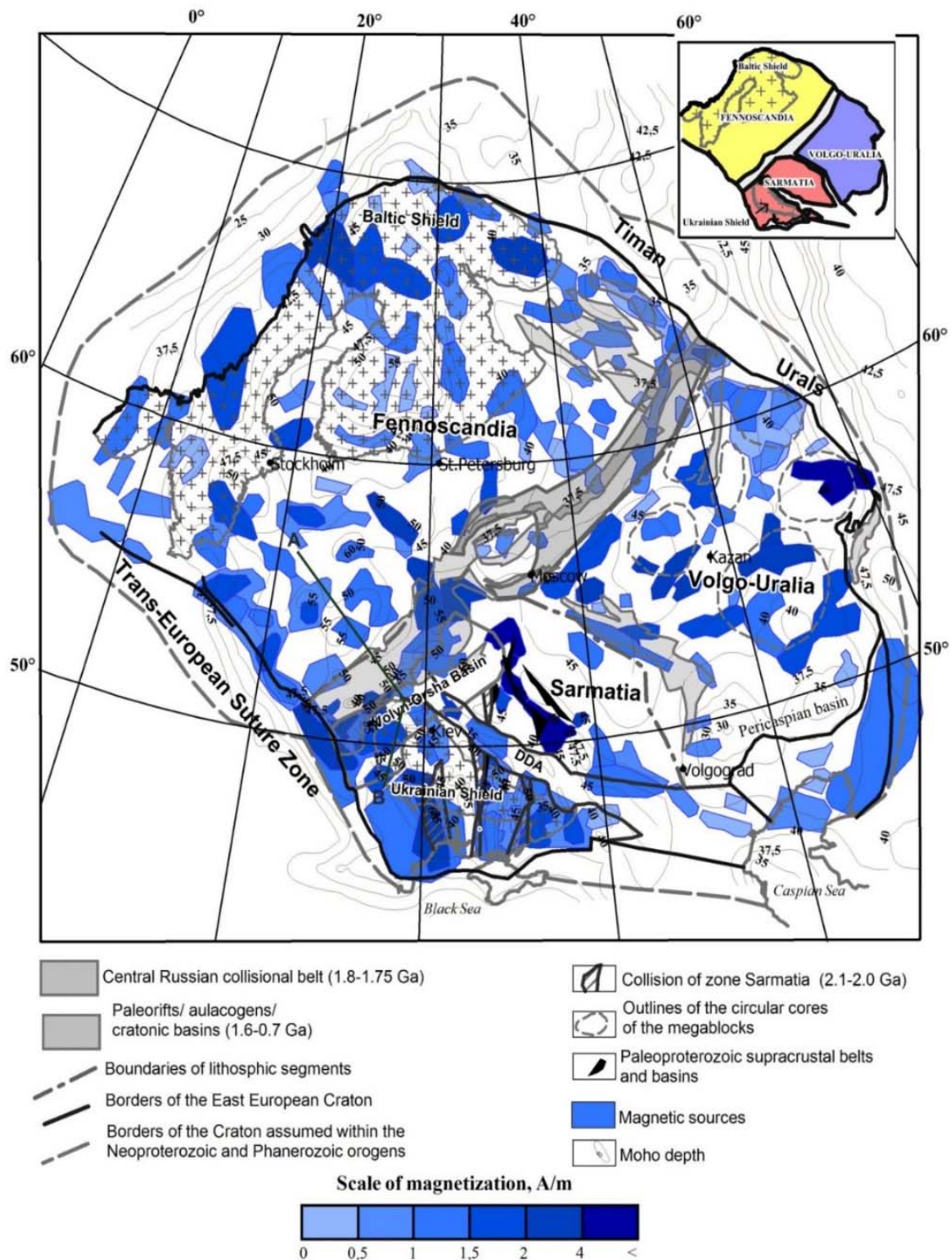
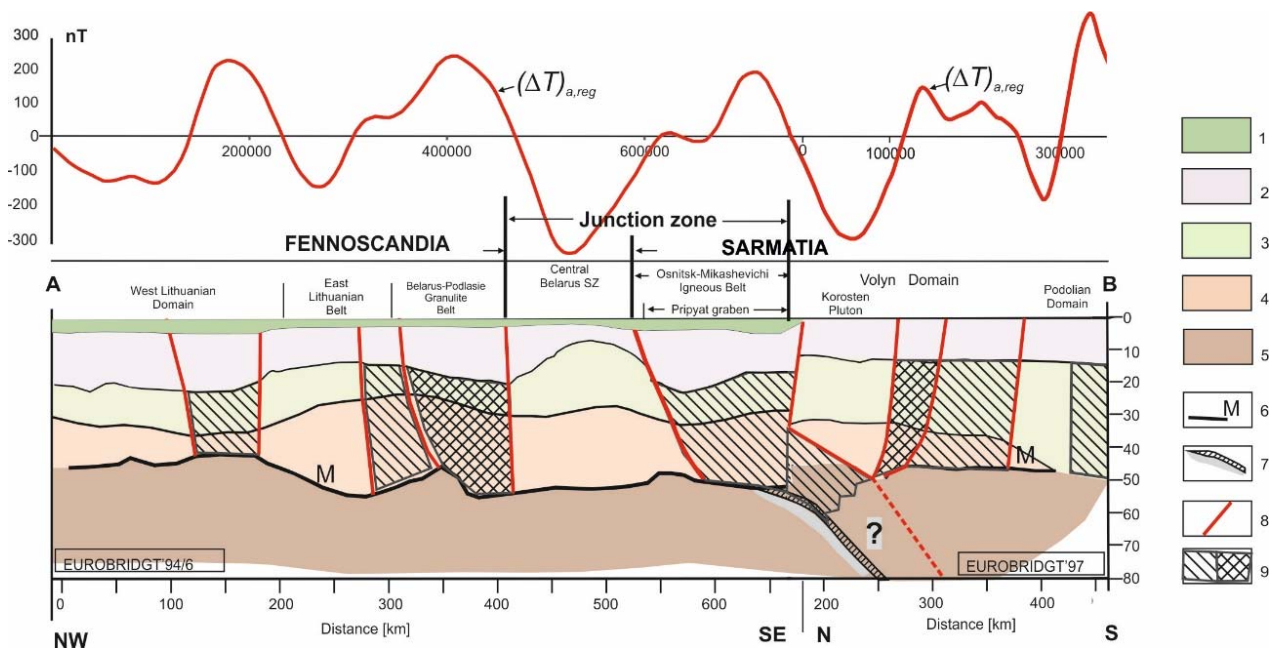


Fig. 1. 3D regional magnetic model of the Earth Crust of the East-European Craton. Tectonic base for S.V. Bogdanova [22]

The magnetic sources junction areas. The East European craton is characterized by rifts and aulacogens underlying the platform sedimentary depressions. As a rule, meso-Neoproterozoic rifts and aulacogens are associated with the system of Paleoproterozoic sutures that appeared at the stage of craton formation from individual segments

(Fig. 2). This group includes Pachelma and Central-Russian avlakogens, as well as the Volyn-Orsha Paleorift. A number of Neoproterozoic rifts are confined to passive continental margins. The Phanerozoic Pripyat-Dnieper-Donets rift and the Oslo graben are sharply discordant with respect to the ancient structures of the craton.



**Fig. 2. Magnetic inhomogeneity of the Earth's crust of the junction zone between Fennoscandia and Sarmatia for the EUROBRIDGE transect (Seismic-geological section for [23]):**

1 – sedimentary cover; 2 – upper crust; 3 – middle crust; 4 – lower crust; 5 – uppermost mantle; 6 – Moho boundary; 7 – mantle reflector or zone of high-velocity gradient; 8 – Faults; 9 – mean magnetization of the crust (A/m)

Within the East European craton, the three Riphean intracratonic rift systems will inherit zones of the Paleoproterozoic articulations of the Fennoscandian, Volgo-Ural and Sarmatian segments of the continental crust. Dynamically these systems represent different types of Paleoproterozoic tectonic events. The suture zone of the Pachelma aulacogene was created by thrusting the Volgo-Uralia onto Sarmatia, the Volyn-Orsha zone of articulation – by pushing the Paleoproterozoic crust of Fennoscandia under Sarmatia and the Central Russian saturation zone, probably formed by the collision of the Volgo-Uralia and the Archaean part of Fennoscandia. Rifting within the age is usually accompanied by mafic magmatism.

The Central Russian rift system divides higher magnetic crust of the Volgo-Uralia and weakly magnetic one of Fennoscandia. The magnetization of the sources in this case is up to 1 A/m from the side of Fennoscandia and up to 2,0 A/m from the Volgo-Ural region. The sources are confined to a system of abrupt faults in the side parts of the aulacogen.

The Volyn-Orsha rift system divides two very different types of crust. The Fennoscandian segment is represented by paleoproterozoic, and Sarmatia is mainly an Archaean. Quantitative interpretation of seismic and magnetic data suggests that the main faults in the crust of Fennoscandia are associated with its immersion under Sarmatia. The Osnitk-Mikashевич belt is also descending to the southeast along the border of Fennoscandia-Sarmatia, and can be traced to the depths of 100 km [3, 22] forming a subduction zone. The subduction zone and the rift system are clearly distinguished by intensive mosaic sources of the regional class with a magnetization of 0,5–3,0 A/m in the magnetic model along the geotransect "EUROBRIDGE" (fig. 2).

The Pachelm rift system is the zone of the saturation of Sarmatia and the Volgo-Uralia [22]. It should be noted that a magnetic source with a magnetization of up to 2,0 A/m and bedding depth of (10–32) km is confined to the southern edge of the aulacogene, which may indicate its dependence on mafic volcanics of Riphean age.

The characteristic features of the Central Russian and Pachelm rift systems are the presence of rifts and increased

heat flux. On the contrary, the rifts and grabens of the Volyn-Orsha avlakogen are less developed and have no clearly defined external boundaries with the host environment, and are characterized by a relatively low heat flux [2].

**Conclusion.** According to [11, 26] the tectonotypes of deep sources are subduction-obducted and rift zones of the Earth's crust, as well as zones of transcrustal faults. In accordance with discussed above, the sources of the edge parts of the EEC can be considered as sources of subduction-obducted type that originated in the Caledonian-Hercynian stage of the formation of its boundaries. The sources of the joint zones of segments formed in a time interval of 2,1–1,8 Ga are likely to have the same nature [11, 13]. With the further development and activation of the EEC, riftogenic type sources that originated in the Riphean-Vendian and later stages of the formation of rifts and transcrustal faults are associated. These can be considered the Central Russian and Volyn-Orsha, Pachelma inter-segment rift systems, as well as intra-segment rifts, such as Pripjat-Dnieper-Donets in Sarmatia, Kaltasinsky in the Volgo-Uralia as well as a suture zone of multiple activation within Fennoscandia.

**Список використаних джерел**

1. Богданова С.В. Земная кора Русской плиты в раннем докембрии / С.В. Богданова. – М. : Наука, 1986. – 220 с.
2. Гарецкий Р.Г. Авлакогены платформ Северной Евразии / Р.Г. Гарецкий // Геотектоника. – 1995. – № 4. – С. 16–28.
3. Гарецкий Р.Г. Тектоногеодинамическая модель сочленения Фенноскандинавского и Сарматского сегментов Восточно-Европейской платформы / Р.Г. Гарецкий, Г.И. Каратаев // Геология и геофизика. – 2011. – № 10 (52). – С. 1557–1566.
4. Інтерпретація регіональних магнітних аномалій з врахуванням сферичності Землі / М.І. Орлюк, В.М. Коваленко-Завойський, І.М. Іващенко, А.В. Марченко. // Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища : тез. VIII Міжнар. конф. – 2007. – С. 76–77.
5. Карта аномального магнітного поля ( $\Delta T$ ) України м-бу 1 : 1 000 000 / Т.С. Нечаєва, Л.М. Шимків, В.М. Горкаво. – 2002. – 1 л.
6. Коваленко-Завойський В.М. Математичне забезпечення інтерпретації поля регіональних магнітних аномалій / В.М. Коваленко-Завойський, І.М. Іващенко // Геофіз. журн. – 2006. – № 5 (28). – С. 18–30.
7. Кутас Р.И. Тепловое поле и геотермический режим литосферы / Р.И. Кутас // Литосфера Центральной и Восточной Европы (обобщение результатов исследований); под ред. А.В. Чекунова. – К., 1993. – С. 114–135.
8. Магнитная модель литосферы Европы / И.К. Пашкевич, В.С. Марковский, М.И. Орлюк и др. – К. : Наук. думка, 1990. – 168 с.



9. Магнитная модель северо-восточной части Европы / Н.В. Федорова, В.В. Колмогорова, А.Л. Рублев, А.Г. Цидаев // Геофиз. исследова- ния. – 2013. – № 2 (14). – С. 25–37.
10. Магнитное склонение на территории Украины: результаты на- блюдений и вычислений / М.И. Орлюк, А.А. Роменец, А.В. Марченко, И.М. Орлюк, И.Н. Иващенко // Геофиз. журн. – 2015. – № 2 (37). – С. 73–85.
11. Орлюк М.И. Глубинные источники региональных магнитных аномалий: тектонотипы и связь с трансформными разломами / М.И. Орлюк, И.К. Пашкевич // Геофиз. журн. – 2012. – № 4(34). – С. 224–234.
12. Орлюк М.И. Магнитная модель юго-западного края Восточно-Ев- ропейской платформы / М.И. Орлюк, И.К. Пашкевич // Геофиз. журн. – 1995. – № 6 (17). – С. 31–36.
13. Орлюк М.И. Пространственные и пространственно-временные магнитные модели разноранговых структур литосферы континенталь- ного типа / М.И. Орлюк // Геофиз. журн. – 2000. – № 6(22). – С. 148–165.
14. Орлюк М.И. Стрoение литосферы вдоль геотранверса III. Магнит- ная модель / М.И. Орлюк // Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотранверсы Ш, VIIIХ; под ред. А.В. Чекунова. – К. : Наук. думка, 1993. – С. 30–35.
15. Орлюк М.И. Картографічне забезпечення розробки 3D магнітної моделі земної кори Східно-Європейської платформи (з урахуванням сферичності Землі) / М.И. Орлюк, А.В. Марченко // Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища : матеріали наук. конф. – 2008. – С. 154–155.
16. Пашкевич И.К. Трехмерная геолого-геофизическая модель лито- сферы центральной части Карельского кратона / И.К. Пашкевич, Н.В. Ша- ров, А.С. Савченко, В.И. Старostenko // Геофиз. журн. – 2014. – № 6(36). – С. 58–78.
17. Петромагнитная модель литосферы / И.К. Пашкевич, Д.М. Пе- черский, А.М. Городницкий и др. – К. : Наук. думка, 1994. – 176 с.
18. Соллогуб В.Б. Литосфера Украины / В.Б. Соллогуб. – К. : Наук. думка, 1986. – 184 с.
19. Схема глубинного строения литосферы юго-западной части Восто- чно-Европейской платформы. М-б 1 : 1 000 000 / А.В. Чекунов, В.Б. Соллогуб, С.С. Красовский и др. – 1992. – 6 л.
20. Федорова Н.В. Модели намагніченості земної кори по геотра- версу Граніт / Н.В. Федорова. // Уральский геофиз. вест. – 2001. – № 2. – С. 88–93.
21. Artemieva I. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // I. Artemieva, D. Mooney // Journal of geophysical research. – 2001. – № 108. – P. 16387–16414.
22. Bogdanova S.V. EUROPE|East European Craton / S.V. Bogdanova, R. Gorbachev, R.G. Garesky // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 2016. – P. 1–18.
23. EUROBRIDGE: new insight into the geodynamic evolution of the East European Craton, in European Lithosphere Dynamics / S.V. Bogdanova, R. Gorbachev, M. Grad et al. // European Lithosphere Dynamics: eds. D.G. Gee, R.A. Stephenson. – London: Geological Society, 2006. – P. 599–625.
24. Grad M. The Moho depth map of the European Plate / M. Grad, T. Tiira, ESC Working Group // Geophysical Journal International. – 2009. – № 176. – С. 279–292.
25. Magnetic anomaly map of the world-carte des anomalies magnétiques du monde / J. Korhonen, J.D. Fairhead, M. Hamoudi et al. – Paris : Commission for Geological Map of the World 1st Edition.
26. Orlyuk M.I. Tektonic interpretation of 4-dimensional magnetic model for the south – western part of the East-European platform / M.I. Orlyuk // Eurobridge workshop. – 1996. – P. 28.
27. Riphean rifting and major Paleoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics / S.V. Bogdanova, I.K. Paskevich, R. Gorbatshev, M.I. Orlyuk // Tectonophysics. – 1996. – № 268. – P. 1–21.
28. The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere / E. Thébault, M. Purucker, K.A. Whaler et al. // Space Science Reviews. – 2010. – P. 95–127. doi:10.1007/s11214-010-9667-6.
29. Nechaeva, T.S., Shymkiv, L.M., Gorkavko, V.M. (2002). Map of anomaly magnetic field ( $\Delta T$ )<sub>a</sub> Ukraine. Scale of 1:1 000 000. Kyiv, 1sh. [In Ukrainian].
30. Kovalenko-Zavoisky, V.M., Ivashchenko, I.M. (2006). Mathematical support of  $\Delta B_a$  field interpretation. *Geophysical Journal*, 28(5), 18–30. [In Ukrainian].
31. Kutas, R.I. (1993). Thermal field and geothermal regime of the lithosphere. In: Chekunov, A.V. (Eds.) Lithosphere Central and Eastern Europe. Summary of the Studies. Kiev: Naukova dumka, 115–132. [In Russian].
32. Pashkevich, I.K., Markovskiy, V.S., Orlyuk, M.I., Eliseeva, S.V., Mozgovaya, A.P., Tarashchan, S.A. (1990). Magnetic model of the lithosphere Europe. Kiev: Naukova Dumka, 168 p. [In Russian].
33. Fedorova, N.V., Kolmogorova, V.V., Rublev, A.L., Tsidaev, A.G. (2013). The magnetic model of the north-eastern region of Europe. *Geofizicheskiye issledovaniya*, 14(2), 25–37. [In Russian].
34. Orlyuk, M.I., Romets, A.A., Marchenko, A.V., Orlyuk, I.M., Ivashchenko, I.N. (2015). Magnetic declination in the territory of Ukraine: the results of observations and calculations. *Geophysical Journal*, 37 (2). 73–85. [In Russian].
35. Orlyuk, M.I., Pashkevich, I.K. (2012). Deep sources of regional magnetic anomalies: tectonotypes and relation with transcrustal faults. *Geophysical Journal*, 34(4), 224–234. [In Russian].
36. Orlyuk, M.I., Pashkevich, I.K. (1995). Magnetic model of the Earth's crust for the South-East of the East-European Platform. *Geophysical Journal*, 17(6), 31–36. [In Russian].
37. Orlyuk, M.I. (2000). Spatial and spatio-temporal magnetic models of different rank structures lithosphere of the continental type. *Geophysical Journal*, 22(6), 148–165. [In Russian].
38. Orlyuk, M.I. (1993). Geotraverse III. Magnetic model. In: Chekunov, A.V. (Eds.) Lithosphere of Central and Eastern Europe. Geotraverses III, VII, IX. Kiev: Naukova Dumka, 30–35. [In Russian].
39. Orlyuk, M.I., Marchenko, A.V. (2008). Mapping support for the 3D magnetic model the earth crust of the East European platform (for spherical Earth). *Thesis of International Scientific Conference "Geophysical technologies for predicting and monitoring of geological media"*. Lviv, 6-10 October 2008, 154–155. [In Ukrainian].
40. Pashkevich, I.K., Sharov, N.V., Savchenko, A.S., Starostenko, V.I. (2014). Three-dimensional geological-geophysical lithosphere model of the central part of the Karelian craton. *Geophysical Journal*, 36(6), 58–78. [In Russian].
41. Pashkevich, I.K., Orlyuk, M.I., Eliseeva, S.V. (1994). Platformal areas of Europe. In: Pechersky, D.M. (Eds.) Petro-magnetic Model of the Lithosphere. Kiev: Naukova Dumka, 109–124. [In Russian].
42. Sollogub, V.B. (1986). Lithosphere of Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 184 p. [In Russian].
43. Chekunov, A.V. (Ed.) (1992). Scheme of lithospheric deep structure of south-western part of the East European Platform. Sc. 1000000. Kyiv: Goscomgeology, 6sh. [In Russian].
44. Fedorova, N.V. (2001). Crustal magnetization models along the Granite geotraverse. *Uralsky geofizichesky vestnik*, 2, 88–93. [In Russian].
45. Artemieva, I., Mooney, D. (2001). Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study. *Journal of geophysical research*, 106, B8, 16387–16414. doi:10.1029/2000JB900439
46. Bogdanova, S., Gorbatshev, R., Garesky, R.G. (2016). EUROPE|East European Craton in book Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 1–18. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X
47. Bogdanova, S., Gorbachev, R., Grad, M. et al. (2006). EUROBRIDGE: new insight into the geodynamic evolution of the East European Craton. In: Gee, D.G., Stephenson, R.A. (Eds.) European Lithosphere Dynamics. London: Geological Society, 32, 599–625.
48. Grad, M., Tiira, T., ESC Working Group. (2009). The Moho depth map of the European Plate. *Geophysical Journal International*, 176, 279–292. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03919.x>
49. Korhonen, J., Fairhead, J.D., Hamoudi, M., Hemant, K., Lesur, V., Mandea, M., Maus, S., Purucker, M., Ravat, D., Sazonova, T., Thébault, E. (2007). Magnetic anomaly map of the world-carte des anomalies magnétiques du monde. Commission for Geological Map of the World 1st Edition. Paris, France.
50. Orlyuk, M.I. (1996). Tektonic interpretation of 4-dimensional magnetic model for the south – western part of the East-European platform. EUROBRIDGE workshop. 8-15 June 1996. Oskarshamn, Sweden, 28.
51. Bogdanova, S.V., Pashkevich, I.K., Gorbatshev, R., Orlyuk, M.I. (1996). Riphean rifting and major Paleoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics. *Tectonophysics*, 268, 1–21.
52. Thébault, E., Purucker, M., Whaler, K.A., Langlais, B., Sabaka, T.J. (2010). The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere. *Space Science Reviews*, 95–127. doi:10.1007/s11214-010-9667-6

М. Орлюк, д-р геол. наук, зав. відділу геомагнетизму  
 E-mail: orlyuk@igph.kiev.ua,  
 А. Марченко, мол. наук. співроб.  
 E-mail: andrey\_marchenko@ukr.net,  
 М. Бакаржієва, старш. наук. співроб.  
 E-mail: bakarjieva@ukr.net  
 Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України  
 пр. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03680, Україна

### 3D МАГНІТНА МОДЕЛЬ ЗЕМНОЇ КОРИ СХІДНОЄВРОПЕЙСЬКОГО КРАТОНУ З УРАХУВАННЯМ СФЕРИЧНОСТІ ЗЕМЛІ ТА ЇЇ ТЕКТОНІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

Геомагнітне поле широко застосовується для отримання інформації щодо глибинної будови та розвитку літосфери Землі, дрібно-масштабного прогнозування корисних копалин, а також вирішення низки екологічних завдань. Найбільш вагомі результати отримуються за рахунок розробки 2D, 3D та 4D магнітних моделей земної кори (літосфери) в яких відображаються просторовий та просторово-часовий розподіл магнітних джерел. Достовірність просторово-часового розподілу (розташування) магнітних джерел і величин їхньої намагніченості залежить від адекватності врахування геометрії об'єктів і неоднорідності головного магнітного поля Землі  $B_{IGRF}$ . У зв'язку з цим для Східноєвропейського кратону вперше розроблено його регіональну 3D магнітну модель для сферичної Землі. Для розробки моделі використано цифрові дані WDMAM на висоті 5 км, априорні дані щодо глибин залягання поверхні кристалічного фундаменту та Мохо, розподілу температур, а також результати інших геолого-геофізичних досліджень. Згідно із С.В. Богдановою, Східно-Європейський кратон сформувався за рахунок зчленування трьох сегментів (Феноскандії, Волго-Уралії та Сарматії) у часовому інтервалі 2,1–1,8 млрд років. На фанерозойському етапі розвитку були сформовані його сучасні границі. Установлено, що в межах кратону спостерігається нерівномірний розподіл магнітних джерел і величин їхньої намагніченості. Максимальна концентрація магнітних джерел характерна для його крайових частин. Південно-західна границя кратону відмічається магнітними джерелами з намагніченістю 1,0–3,0 А/м на глибинах 10–18÷46 км. Простягання джерел узгоджується з простяганням Трансєвропейської сутурної зони та Балтійсько-Придністровської зони перикратонних прогинів (опускань). Простягання магнітних джерел на північному сході кратону в межах Феноскандії та Волго-Уралії узгоджене з простяганням фанерозойських структур Уралу та Тиману. Магнітні джерела залягають в інтервалі 10–18÷38–44 км і мають намагніченість 0,7–4,0 А/м. Магнітні джерела північної (у межах Феноскандії) та південної (у межах Сарматії) частин кратону мають торцеве зчленування з його границею. Зони зчленування сегментів СЄК також виділяються джерелами регіональних магнітних аномалій. Магнітні джерела Центрально-Російської рифтової системи розділяють магнітну кору Волго-Уралії та слабомагнітну кору Феноскандії, а джерела Волинсько-Оршанської рифтової системи – Феноскандії і Сарматії. Магнітні джерела Пачелмської рифтової зони розділяють Сарматію та Волго-Уралію. Зауважимо, що приблизно таке ж простягання мають магнітні аномалії Курсько-Брянської смуги з максимальними, у межах кратону, величинами намагніченості їхніх джерел ( $>10,0$  А/м). Згідно із концепцією тектоніки літосферних плит магнітні неоднорідності зон зчленування сегментів кратону та його зовнішніх границь можуть розглядатися як джерела субдукційно-обдукційного типу, що виникли на етапі їхнього формування. На рифейському та фанерозойському етапах розвитку літосфери в межах зон зчленування сегментів кратону та його зовнішніх границь формувалися магнітні джерела рифтової природи. Магнітні джерела субдукційно-обдукційного та рифтогенного типів характеризуються відповідною металогенічною спеціалізацією, тому розроблена модель може бути використана як для тектонічних і геодинамічних побудов, так і для дрібномасштабного прогнозування корисних копалин.

Ключові слова: Східноєвропейський кратон, 3D магнітна модель.

М. Орлюк, д-р геол. наук, зав. отделом геомагнетизма  
 E-mail: orlyuk@igph.kiev.ua,  
 А. Марченко, мл. науч. сотр.  
 E-mail: andrey\_marchenko@ukr.net,  
 М. Бакаржієва, ст. науч. стр  
 E-mail: bakarjieva@ukr.net  
 Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України  
 пр. Акад. Палладіна, 32, г. Киев, 03680, Украина

### 3D МАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ ВОСТОЧНОЕВРОПЕЙСКОГО КРАТОНА С УЧЕТОМ СФЕРИЧНОСТИ ЗЕМЛИ И ЕЕ ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Геомагнитное поле широко применяется для получения информации о глубинном строении и развитии литосферы Земли, мелко-масштабного прогнозирования полезных ископаемых, а также решения ряда экологических задач. Наиболее весомые результаты получаются за счет разработки 2D, 3D и 4D магнитных моделей земной коры (литосферы) в которых отражаются пространственное и пространственно-временное распределение магнитных источников. Достоверность пространственно-временного распределения (расположение) магнитных источников и величин их намагнитченности зависит от адекватности учета геометрии объектов и неоднородности главного магнитного поля Земли  $B_{IGRF}$ . В связи с этим для Восточноевропейского кратона впервые разработана его региональная 3D магнитная модель для сферической Земли. Для разработки модели использованы цифровые данные WDMAM на высоте 5 км, априорные данные о глубине залегания поверхности кристаллического фундамента и Мохо, распределения температур, а также результаты других геолого-геофизических исследований. Согласно С.В. Богдановой, Восточноевропейский кратон сформировался за счет сочленения трех сегментов (Феноскандии, Волго-Уралии и Сарматии) во временном интервале 2,1–1,8 млрд лет. На фанерозойском этапе развития были сформированы современные его границы. Установлено, что в пределах кратона наблюдается неравномерное распределение магнитных источников и величин их намагнитченности. Максимальная концентрация магнитных источников характерна для его крайевых частей. Юго-западная граница кратона отмечается магнитными источниками с намагнитченностью 1,0–3,0 А/м на глубинах 10–18÷46 км. Простирание источников согласуется с простиранием Трансєвропейской сутурной зоны и Балтійсько-Придністровської зони перикратонних прогибов (опусканій). Простирание магнитных источников на северо-востоке кратона – в пределах Феноскандии и Волго-Уралии согласно с простиранием фанерозойских структур Урала и Тимана. Магнитные источники залегают в интервале 10–18 ÷ 38–44 км и имеют намагнитченность 0,7–4,0 А/м. Магнитные источники северной (в пределах Феноскандии) и южной (в пределах Сарматии) частей кратона имеют торцевое сочленение с его границей. Зоны сочленения сегментов ВЕК также выделяют источники региональных магнитных аномалий. Магнитные источники Центрально-Російської рифтової системи разделяют магнитную кору Волго-Уралии и слабомагнитную кору Феноскандии, а источники Волинсько-Оршанської рифтової системи – Феноскандии и Сарматии. Магнитные источники Пачелмской рифтової зони разделяют Сарматію и Волго-Уралію. Заметим, что примерно такое же простирание имеют магнитные аномалии Курсько-Брянской полосы в пределах кратона, величинами намагнитченности их источников ( $>10,0$  А/м). Согласно концепции тектоники литосферных плит магнитные неоднородности зон сочленения сегментов кратона и его внешних границ могут рассматриваться как источники субдукционно-обдукционного типа, возникшие на этапе их формирования. На рифейском и фанерозойском этапах развития литосферы, в пределах зон сочленения сегментов кратона и его внешних границ, формировались магнитные источники рифтової природи. Магнитные источники субдукционно-обдукционного и рифтогенного типов характеризуются соответствующей металогенической специализацией, поэтому разработанная модель может быть использована как для тектонических и геодинамических построений, так и для мелкомасштабного прогнозирования полезных ископаемых.

Ключевые слова: Восточноевропейский кратон, 3D магнитная модель.

УДК 550.31

H. Guliyev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Academician of ANAS  
 Head of department "Tectonophysics and Geomechanics"  
 E-mail: hatamguliyev@gmail.com, tel.: (+994 12) 5105617  
 Institute of Geology and Geophysics of ANAS  
 119 H. Javid Ave., Baku, AZ1143, Azerbaijan

## THE FEATURES OF THE PROPAGATION OF ELASTIC WAVES IN ISOTROPIC MEDIA AT HIGH AND ULTRA-HIGH PRESSURES

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Б.П. Масловим)

Studies of problems of the propagation of elastic waves in the geological medium constitute the scientific basis of the processing and interpretation of dataset of seismic exploration and seismological works.

**Objective.** Creation of a more grounded theoretical basis of the geomechanical interpretation of various groups of geophysical observational and experimental data.

**Methodology.** Nonclassical-linearized approach of non-linear elastodynamics. Linear and nonlinear small and large initial deformations are taken into account. The strain processes are described applying various elastic potentials.

**Results.** Analytical dependences of the parameters of pressure and velocities of propagation of elastic waves on deformations without additional linearization are obtained within the framework of various versions of the theory of small and initial deformations using the quadratic and elastic potentials of the Murnaghan type.

**Scientific novelty.** It is established that there are critical values of deformation while reaching them elastic pressure and shear waves with true velocity cannot propagate in uniformly deformed elastic isotropic media. The quantitative values of the critical values of deformations for pressure and shear waves differ, and essentially depend on the applied elastic potentials.

**Practical significance.** The obtained analytical dependences allow synthesizing the true values of the elastic parameters of the deformed media from seismic exploration and seismological dataset. The establishment of critical deformations for velocities of pressure and shear waves will make it possible to suggest differential criteria of the distribution of elastic parameters in theoretical models of the Earth in its various structural elements as a whole and separately.

**Keywords.** Nonlinear elastodynamics, elastic waves, initial deformation, velocities of pressure and shear waves.

**Introduction.** The nonclassical-linearized approach (NLA) of nonlinear elastodynamics has been greatly developed in studies of problems of the mechanics of a deformed solid body in the last few decades [4, 5, 10, 11, 16, 18, 21, 37]. Later the NLA was applied to study various problems of geology, geophysics, mining, etc. [1, 3, 6–9, 11, 19, 20, 26]. The problems are considered in all these studies excluding separate papers in case of the ratio of the pressure parameter  $P$  to the shear modulus  $\mu$  is much less than unit. Based on this circumstance, a direction is developed in the NLA where after the linearization of all the equations and correlations in a small neighborhood of the disturbed state (both at small and large initial deformations), linearization is also additionally carried out in terms of the parameter  $\frac{P}{\mu}$ .

This constraint is not adequate with both practically [2, 12, 13] and experimentally observed result [14, 29, 30, 32, 33] in large classes of problems of geology and geophysics. In particular, the distribution of physico-mechanical as well as elastic parameters of the Earth are obtained in the theoretical structural and dynamic models of the Earth [2,

12, 13, 15, 17, 22–25, 27, 28, 31, 34–36, 38] while violating the condition of smallness of the indicated correlation.

It is shown that, the basic requirements of the mechanics of the deformable solid body relating to the strength, stability and propagation of elastic waves with true velocity are violated in the process of the generally accepted distribution of the elastic parameters of the medium and pressure in the inner solid core of the Earth applying the NLA (under the conditions  $\frac{P}{\mu} \ll 1$ ) in [20]. In this connection, it is of scientific

and applied interest to study the character of changes of parameters of propagation of velocities of elastic waves and pressures as a function of changes of strains within the NLA under the conditions of removing the constraints  $\frac{P}{\mu} \ll 1$

which are important for the problems of geophysics of deep depths. Theoretical results are used for this purpose [4, 5].

**Materials and methods.** Let's consider an unbounded elastic space subject to homogeneous deformation in the Lagrangian coordinate system  $x_n = x_n^1$  coinciding in the natural state with Cartesian coordinates.

$$u_m^0 = (\lambda_m - 1)\lambda_m; \lambda_m = \text{const}, m = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Where  $u_m^0$  are components of the displacement vector of the initial-deformed state, and  $\lambda_m$  are coefficients of elongation (shortening) along the coordinate axes.

Further, let's consider the problems on the propagation of elastic waves in a previously deformed isotropic space under the conditions (1)–(3).

In case of compressible models of the medium, the basic systems of equation of motion for the theory of large and various versions of the theory of small initial deformations in a unified form have the form [4, 5]

$$a_{ij\alpha\beta} \frac{\partial^2 u_\alpha}{\partial x_i \partial x_\beta} - \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = 0, \quad a_{ij\alpha\beta} = \text{const}. \quad (2)$$

In case of the theory of large initial deformations

$$a_{ij\alpha\beta} = \lambda_j \lambda_\alpha \left[ \delta_{ij} \delta_{\alpha\beta} A_{i\beta} + (1 - \delta_{ij})(\delta_{i\alpha} \delta_{j\beta} + \delta_{i\beta} \delta_{j\alpha}) \mu_{ij} \right] + \delta_{i\beta} \delta_{j\alpha} S_{\beta\beta}^0. \quad (3)$$

For the theory of small initial deformations according to the first and the second versions of the theory

$$a_{ij\alpha\beta} = \lambda_j \lambda_\alpha \left[ \delta_{ij} \delta_{\alpha\beta} A_{i\beta} + (1 - \delta_{ij})(\delta_{i\alpha} \delta_{j\beta} + \delta_{i\beta} \delta_{j\alpha}) \mu_{ij} \right] + \delta_{i\beta} \delta_{j\alpha} \sigma_{\beta\beta}^0, \quad (4)$$

$$\omega_{i j \alpha \beta} = \delta_{i j} \delta_{\alpha \beta} A_{i \beta} + (1 - \delta_{i j})(\delta_{i \alpha} \delta_{j \beta} + \delta_{i \beta} \delta_{j \alpha}) \mu_{i j} + \delta_{i \beta} \delta_{j \alpha} \sigma_{\beta \beta}^0 \quad (5)$$

The following correlations [4, 5] are obtained considering elastic waves propagating along the axis  $ox_1$  according to the equation (4) in case of the theory of large initial deformations

$$\rho C_{I x_1}^2 = \lambda_1^4 A_{11} + \lambda_1^2 S_{11}^0; \quad \rho C_{s x_2}^2 = \lambda_1^4 \lambda_2^2 \mu_{12} + \lambda_1^2 S_{11}^0, \quad (6)$$

$$\rho C_{s x_3}^2 = \lambda_1^4 \lambda_2^2 \mu_{13} + \lambda_1^2 S_{11}^0.$$

In case of the second variant of the theory of small initial deformations

$$\rho V_{I x_1}^2 = \lambda_1^2 (A_{11} + \sigma_{11}^0); \quad \rho V_{s x_2}^2 = \lambda_1^2 (\mu_{12} + \sigma_{11}^0); \quad \rho V_{s x_3}^2 = \lambda_1^2 (\mu_{13} + \sigma_{11}^0). \quad (7)$$

The structure of the values  $A_{i \beta}, \mu_{i j}$  and  $S_{\beta \beta}^0$  (or  $\sigma_{\beta \beta}^0$ ) for each version of the problem statements is concretized by the definition of the correlations of the elasticity of the nonlinear theory (elastic potentials) in the correlations (3)–(5). Specific expressions of these values for the simplest elastic potentials are given in [4, 5, 21]. In the expressions (2)–(7),  $u_i (i = 1, 2, 3)$  are the components of the perturbation of displacements,  $S_{\beta \beta}^0$  are the components of the stress tensor assigned to a unit of an area in the initial-deformed state,  $\sigma_{ii}^0$  is the stress tensor component assigned to a unit of an area in the natural state,  $\rho$  is the medium density and  $\delta_{i j}$  are the Kronecker symbols. It is easy to obtain

$$A_{i \beta} = \lambda + 2a \varepsilon_{nn}^0 + 2b (\varepsilon_{ii}^0 + \varepsilon_{\beta \beta}^0) + 2\delta_{i \beta} (\mu + b \varepsilon_{nn}^0 + c \varepsilon_{ii}^0), \quad (8)$$

$$\mu_{ij} = \mu + b \varepsilon_{nn}^0 + \frac{1}{2} c (\varepsilon_{ii}^0 + \varepsilon_{jj}^0), \quad \lambda, \mu, a, b, c = \text{const}. \quad (9)$$

For theories of large initial pressure

$$S_{\beta \beta}^0 = \lambda \varepsilon_{nn}^0 + 2\mu \varepsilon_{\beta \beta}^0 + a (\varepsilon_{nn}^0)^2 + 2b \varepsilon_{nn}^0 \varepsilon_{\beta \beta}^0 + b (\varepsilon_{nn}^0)^2 + c (\varepsilon_{\beta \beta}^0)^2, \quad (10)$$

where  $\lambda, \mu$  are Lamé's elasticity moduli,  $a, b, c$  are the elasticity moduli of the third order.

There are correlations for the first and the second version of the theory of small initial deformations correspondingly

$$\sigma_{\beta \beta}^0 = \lambda \varepsilon_{nn}^0 + 2\mu \varepsilon_{\beta \beta}^0 + a (\varepsilon_{nn}^0)^2 + 2b \varepsilon_{nn}^0 \varepsilon_{\beta \beta}^0 + b (\varepsilon_{nn}^0)^2 + c (\varepsilon_{\beta \beta}^0)^2, \quad 2\varepsilon_{ij}^0 = \delta_{ij} (\lambda_j^2 - 1), \quad (11)$$

$$\sigma_{\beta \beta}^0 = \lambda \varepsilon_{nn}^0 + 2\mu \varepsilon_{\beta \beta}^0 + a (\varepsilon_{nn}^0)^2 + 2b \varepsilon_{nn}^0 \varepsilon_{\beta \beta}^0 + b (\varepsilon_{nn}^0)^2 + c (\varepsilon_{\beta \beta}^0)^2, \quad \varepsilon_{ij}^0 = \delta_{ij} (\lambda_j - 1). \quad (12)$$

Formulae (6) and (7) considering the correlations (8)–(12) allow studying the behavior of the parameters of velocities of propagation of elastic waves in isotropic compressible solid media depending on the nature of the change of random value of homogeneous deformations within the theory of large and two versions of the theory of small initial deformations. These formulae and correlations are obtained and applied to solve various specific problems of mechanics in [4, 5, 21]. An additional linearization is carried out in the expressions of formulae (10)–(12) eliminating nonlinear terms with respect to deformations in the study of specific problems based on practical mechanical arguments.

Pressure  $P$  with stress are related to the following correlations [21] for the theory of large, first and the second variants of small initial deformations

for the theory of large and the first version of small initial states

$$P_0 = (1 + 2\varepsilon_0) \frac{1}{2} [3K_0 \varepsilon_0 + (9a + 15b + c) \varepsilon_0^2]; \quad K_0 = \lambda + \frac{2}{3} \mu, \quad (14)$$

for the second version of the theory of small initial deformation states

$$P_0 = 3K_0 \varepsilon_0 + (9a + 15b + c) \varepsilon_0^2. \quad (15)$$

analogous formulae in case of the propagation of elastic waves along other coordinate axes through cyclic permutations of the indices in (8) and (9).

The experimentally observed acoustoelastic effect (of various kind of reactions, velocities of polarized shear waves on the action of initial deformations) in comparatively solid compressible media is described using elastic potentials in the structure of which, the third algebraic invariant of the Green's deformation tensor [4, 5] is also taken into account along with the first two. The simplest elastic potential corresponding to this requirement is a potential of the Murnaghan type. Thereby, the results concerning the potential of the Murnaghan type are given below.

In this case for all variants of the theory of initial deformations [4, 5]

$$P_{\beta}^0 = \lambda_{\beta} S_{\beta \beta}^0; \quad P_{\beta}^0 = \lambda_{\beta} \sigma_{\beta \beta}^0; \quad P_{\beta}^0 = \sigma_{\beta \beta}^0. \quad (13)$$

**The nonlinear character of the dependence of the basic parameters of the medium on the change of strains.** Normal components of stress tensor within the theory of large and small initial strains within the NLA are determined according to the equations (10)–(12).

Let's consider the case of overall deformation for clarity and simplicity of statement especially in problems of geomechanics of large depths of overall deformation, i.e.  $\varepsilon_{11}^0 = \varepsilon_{22}^0 = \varepsilon_{33}^0 = \varepsilon_0$  is the most important case. At the same time we get from correlations (10)–(12) considering (13):

Using the correlations (6), (7) and (8)–(12) in case of overall homogeneous deformation to determine the dependence of the quasive locities of propagation of elastic waves on deformations considering the well-known correlations

$$\rho C_{l0}^2 = \lambda + 2\mu, \quad \rho C_{s0}^2 = \mu, \tag{16}$$

$$\rho V_{l0}^2 = \lambda + 2\mu, \quad \rho V_{s0}^2 = \mu, \tag{17}$$

in case of the theory of large and the first version of small initial deformations we will get

$$\left(\frac{C_{lx_1}}{C_{l0}}\right)^2 = 1 + \left[\frac{5-3\nu}{1-\nu} + (\lambda+2\mu)^{-1}(6a+10b+2c)\right]\varepsilon_0 + \left[\frac{2(3-\nu)}{(1-\nu)} + (33a+55b+9c)(\lambda+2\mu)^{-1}\right]\varepsilon_0^2 + (\lambda+2\mu)^{-1}(42a+70b+10c)\varepsilon_0^3, \tag{18}$$

$$\left(\frac{C_{sx_2}}{C_{s0}}\right)^2 = \left(\frac{C_{sx_3}}{C_{s0}}\right)^2 = 1 + \left[\frac{6(1-\nu)}{1-2\nu} + \frac{1}{\mu}(3b+c)\right]\varepsilon_0 + \left[\frac{4(2-\nu)}{1-2\nu} + \frac{1}{\mu}(9a+27b+5c)\right]\varepsilon_0^2 + \frac{1}{\mu}(18a+42b+6c)\varepsilon_0^3, \tag{19}$$

$$\left(\frac{V_{lx_1}}{V_{l0}}\right)^2 = 1 + \left[\frac{3-\nu}{1-\nu} + (\lambda+2\mu)^{-1}(6a+10b+2c)\right]\varepsilon_0 + \left[\frac{3+\nu}{1-\nu} + (\lambda+2\mu)^{-1}(21a+35b+5c)\right]\varepsilon_0^2 + \left[\frac{1+\nu}{1-\nu} + (\lambda+2\mu)^{-1}(24a+40b+4c)\right]\varepsilon_0^3 + (\lambda+2\mu)^{-1}(9a+15b+c)\varepsilon_0^4, \tag{20}$$

$$\left(\frac{V_{sx_2}}{V_{s0}}\right)^2 = \left(\frac{V_{sx_3}}{V_{s0}}\right)^2 = 1 + \left[\frac{2(2-\nu)}{1-2\nu} + \mu^{-1}(3b+c)\right]\varepsilon_0 + \left[\frac{5+2\nu}{1-2\nu} + \mu^{-1}(9a+21b+3c)\right]\varepsilon_0^2 + \left[\frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} + \mu^{-1}(18a+33b+3c)\right]\varepsilon_0^3 + \mu^{-1}(9a+15b+c)\varepsilon_0^4. \tag{21}$$

Here  $C_{l0}$  and  $C_{s0}$  are the velocities of propagation of pressure and shear waves in the medium without initial deformations within the theory of large initial deformations accordingly;  $V_{l0}$  and  $V_{s0}$  are the same within the second version of the theory of small initial deformations. In the correlations (18)–(21),  $\nu$  – is Poisson's ratio of the material. The parameters of pressure and shear waves within the theory of large - the first version of the theory of small and the second version of the theory of small initial deformations

are defined with values  $\left(\frac{C_{lx_1}}{C_{l0}}\right)^2$ ,  $\left(\frac{C_{sx_2}}{C_{s0}}\right)^2$  and  $\left(\frac{V_{lx_1}}{V_{l0}}\right)^2$ ,  $\left(\frac{V_{sx_2}}{V_{s0}}\right)^2$  in the paper accordingly.

In case of the quadratic elastic potential in the formulae (14), (15) and (18)–(21), it is necessary to consider  $a = b = c = 0$ .

**Initial data for numerical experiments.** The structures of formulae (14), (15) and (18)–(21) allow performing calculations for the entire interval of variation of the Poisson's ratio  $0 < \nu < 0,5$  in case of using the quadratic elastic potential. In case of applying an elastic potential of the Murnaghan type for performing specific calculations, it is also necessary to have information on the elasticity moduli of the second ( $\lambda, \mu$ ) and the third ( $a, b, c$ ) orders.

The necessary initial data for a number of materials are shown in Table 1. Data for plexiglas and steel 092c are taken from [4], and data for plagiogranite are taken from [8]. The data related to the theory of large initial deformations are given in the numerator and the data related to the second version of the theory of small initial deformations are given in the denominator. The dashes in the plagiogranite column indicate lack of data for this case.

**Table 1. The necessary initial data for a number of materials**

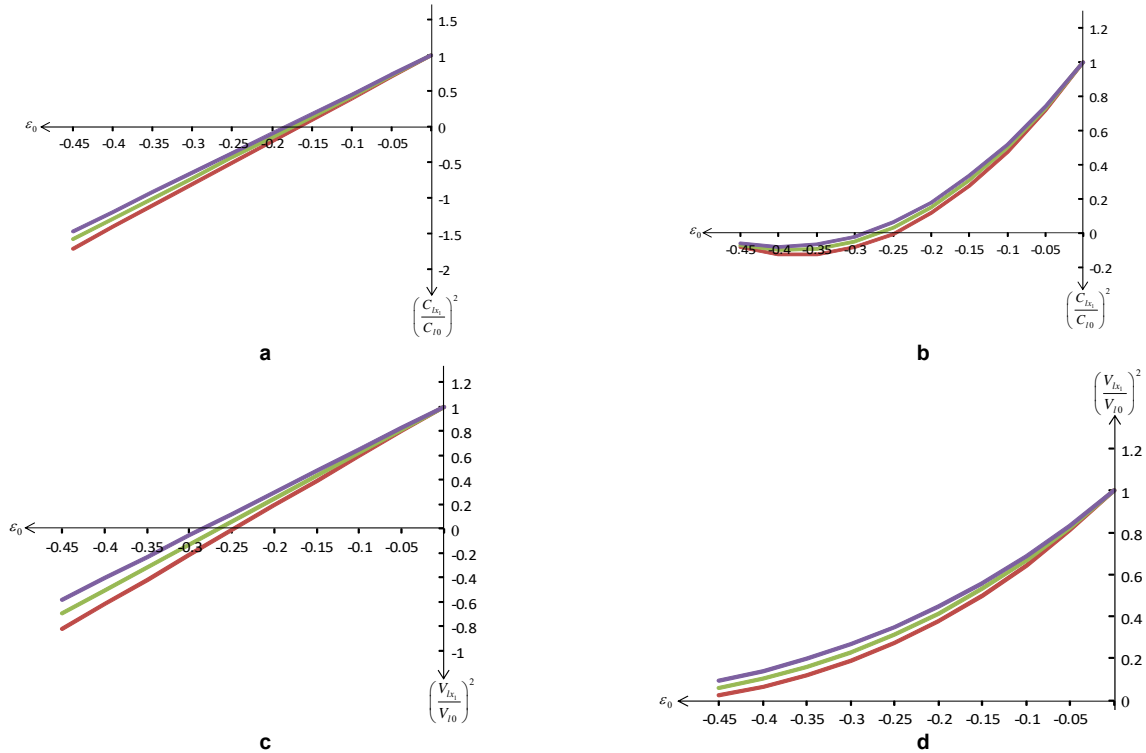
Medium parameters	$10^{-3}a$ , MPa	$10^{-3}b$ , MPa	$10^{-3}c$ , MPa	$10^{-3}\lambda$ , MPa	$10^{-3}\mu$ , MPa	$\nu$
Plexiglas	$\frac{-3,99}{0,268}$	$\frac{-7,16}{-3,12}$	$\frac{-14,4}{-6,77}$	4,04	1,9	0,3401
Steel	$\frac{-325}{-269}$	$\frac{-309}{-214}$	$\frac{-799}{-483}$	94,4	79,0	0,2722
Plagiogranite	$\frac{-3,87}{-}$	$\frac{-1,99}{-}$	$\frac{-6,24}{-}$	39,95	26,63	0,1999

**Results and discussion.** Graphs of change of the parameters of pressure and shear elastic waves in plexiglas

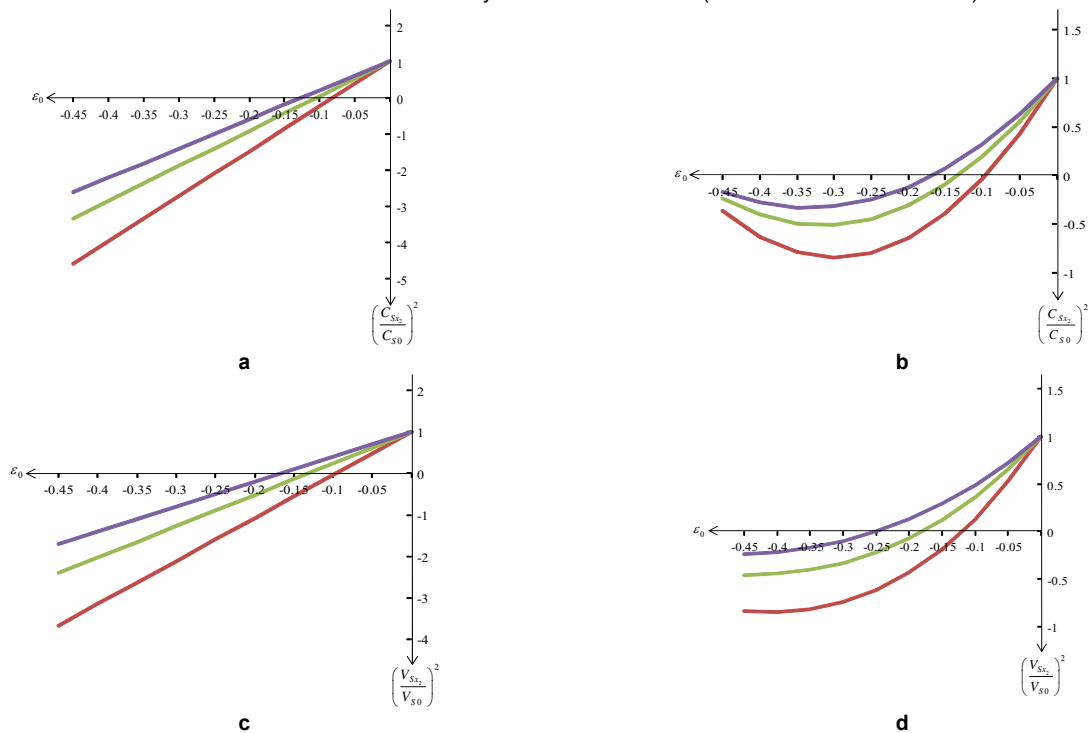
(red color), steel 092C (green color) and plagiogranite (blue color) depending on the growth of compression

deformations are shown in Fig. 1-2. These calculations are performed using the quadratic elastic potential. Similar results calculated using an elastic potential of the Murnaghan type are shown in Fig. 3, 4. Comparison of the results in Fig. 1–2 with Fig. 3–4 show that the results obtained using various elastic potentials differ quantitatively. In this case, it is necessary to give preference to results

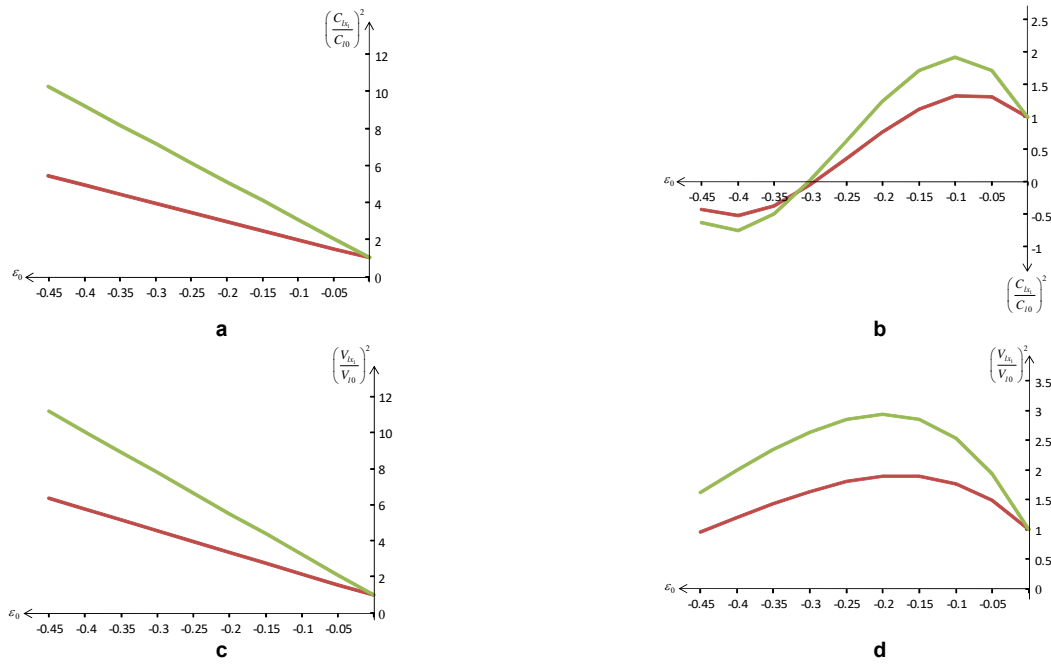
corresponding to the potential of the Murnaghan type, since it is known that [4] the use of this potential allows correctly describing the acoustoelastic effect. The character of the change of parameters of pressure and shear waves fundamentally differ within the framework of linear and nonlinear approximations due to the increase of the value of compression deformation.



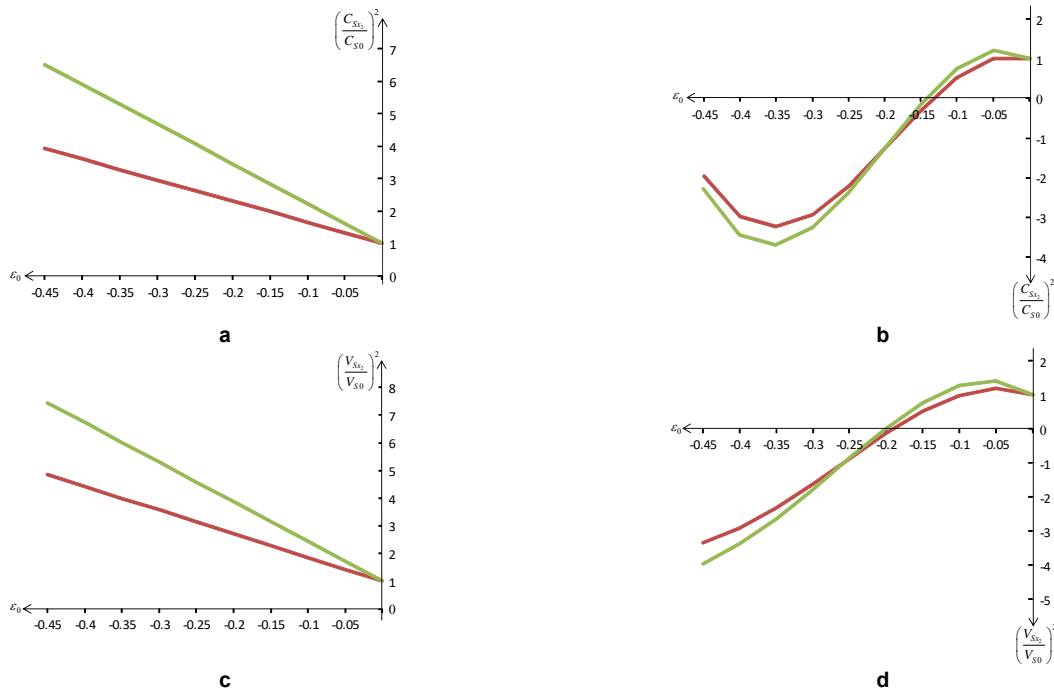
**Fig. 1. Dependences of the parameter of elastic waves pressure on the growth of values of compression strains:** a – equation (18) considering linear constituents, b – equation (18) considering all the constituents within the theory of large and the first variation of small initial strains, c – equations (20) considering the linear constituents, d – equations (20) considering all the constituents within the second version of the theory of small initial strains (in calculations  $a = b = c = 0$ )



**Fig. 2. Dependences of the parameter of shear elastic waves on the increase of values of compression deformations:** a – equation (19) considering only linear constituents, b – equation (19) considering all the constituents within the theory of large and the first version of the theory of small initial deformations, c – equation (21) considering only linear constituents, d – equation (21) considering all the constituents within the second variation of the theory of small initial deformations (in calculations  $a = b = c = 0$ )



**Fig. 3. Dependences of the parameter of elastic waves pressure on the increase of the values of compression deformations:** a – equation (18) considering only linear constituents, b – equation (18) considering all the constituents within the theory of large and the first version of the theory of small initial deformations, c – equation (20) considering only linear constituents, d – equation (20) considering all the constituents within the second version of the theory of small initial deformations



**Fig. 4. Dependences of the parameter of elastic waves pressure on the increase of the values of compression deformations:** a – equation (19) considering only linear constituents, b – equation (19) considering all constituents within the theory of large and the first version of the theory of small initial deformations, c – equation (21) considering only the linear constituents, d – equation (21) considering all the constituents within the second version of the theory of small initial deformations

It follows from Fig. 1–4 that the values of the quasi-velocities of pressure and shear waves decrease in case of quadratic elastic potentials both at small (taking into account both variants) and large initial deformations due to the increase of compression deformation. Such results do not describe available [4] experimental data. Similar results for the considered materials obtained within the framework of an elastic potential of the Murnaghan type show fundamentally different character of the change. The quasi-

velocity of both pressure and shear waves increase for each concrete material up to a certain value of the deformation values of overall compression within the framework of all variants of the theory of initial deformations and types of elastic waves. Further, due to the increase of values of compression deformation, the values of the quasi-velocities of both types of volume waves continue to increase within the framework of linear approximations, and they decrease within the framework of nonlinear solutions. For both types

of volume waves, there are critical values of the compression deformation while reaching them elastic waves with true velocity cannot propagate in the medium. Despite the quantitative difference in the increase of quasi-velocities in the initial stage of the increase of values of compression deformation, critical values of compression deformations are found in the further stages of deformations (at large deformations) within the framework of the considered versions of the theory of the quadratic potential.

Based on the obtained theoretical formulae and numerical results, the impossibility of propagation of elastic waves with true velocity in the deformed media can be explained as follows. Dimensions of stresses and elasticity moduli are the same. The quantitative values of velocities of propagation of elastic waves are determined in the form of certain ratios of the elasticity moduli to the medium density. In case of deformed media, the ratio of the values of stress tensor components to the density is caused by nonlinear actions of the medium by the velocity dimension. The levels of the normal components of the stress tensor reach values comparable to the elasticity moduli of the medium of propagation of elastic waves under high baric conditions. Therefore, the quasi-velocities of elastic waves can increase, decrease, and turn to zero in the process of deformation depending on the nature of the action and on the stress level.

**Conclusions.** The dependences of change of pressure, parameters characterizing the velocities of pressure and shear elastic waves on the increase of values of the compression deformation in elastic isotropic media are analyzed within the framework of linear and nonlinear approximations of the NLA of nonlinear elastodynamics involving various elastic potentials. The linear and nonlinear solutions obtained within the framework of various elastic potentials differ quantitatively and qualitatively. Consideration of large and nonlinear strains of compression made it possible to determine their critical values while reaching them elastic pressure and shear waves with true velocities cannot propagate in elastic isotropic media. These features manifested in the process of propagation of elastic waves in the deformed isotropic media have important theoretical and applied values in the development of structural and true models of the Earth. It is necessary to properly take them into account in the process of development and interpretation of the corresponding geophysical data.

#### Список використаних джерел

1. Александров К.С. Метод определения нелинейных упругих свойств горных пород / К.С. Александров, Г.Т. Продайвода, Б.П. Маслов // Доклады академии наук. – 2001. – № 380,1. – С. 109–112.
2. Буллен К.Е. Плотность Земли / К.Е. Буллен. – М.: Мир, 1978. – 422 с.
3. Выква С.А. Эффективные упругие свойства нелинейных многокомпонентных геологических сред / С.А. Выква, Б.П. Маслов, Г.Т. Продайвода // Геофиз. журн. – 2005. – № 27, 6. – С. 1012–1022.
4. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями / А.Н. Гузь. – К.: Наук. думка, 1986. – 916 с.
5. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями / А.Н. Гузь. – К.: А.С.К, 2004. – 672 с.
6. Кулиев Г.Г. Об амплитудных характеристиках упругих волн в напряженных средах / Г.Г. Кулиев, М.Д. Джаббаров // Докл. АНР. – 2000. – № 370, 4. – С. 672–674.
7. Маслов Б.П. Дисперсия и рассеяние упругих волн в трещиноватой геологической среде / Б.П. Маслов, Г.Т. Продайвода // Геофиз. журн. – 1998. – № 20, 2. – С. 47–55.
8. Продайвода Г.Т. Математичне моделювання ефективних геофізичних параметрів / Г.Т. Продайвода, С.А. Выква, І.В. Віршило. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2012. – 287 с.
9. Продайвода Г.Т. Сейсмоминералогическая модель земной коры Украинского щита / Г.Т. Продайвода, В.Д. Омельченко, Б.П. Маслов // Геофиз. журн. – 2004. – № 26, 4. – С. 100–107.
10. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред / К. Трусделл. – М.: Мир, 1975. – 592 с.
11. Akbarov S.D. DynamicsofPre-StrainedBi-MaterialElasticSystems: LinearizedThree-DimensionalApproach / S.D. Akbarov. – Switzerland: Springer, 2015. – 1004 с.

12. Anderson D.L. New Theory of the Earth / D.L. Anderson. – New York: Cambridge University Press, 2007. – 400 с.

13. Anderson O.L. Equations of State of Solids for Geophysics and Ceramic Science / O.L. Anderson. – New York: Oxford University Press, 1995. – 432 с.

14. Antonangeli D. Sound velocity of hcp-Fe at high pressure: experimental constraints, extrapolations and comparison with seismic models / D. Antonangeli, E. Ohtani // Progress in Earth Planetary Science. – 2015. – № 2, 3. – С. 1–11.

15. Badro J. A seismologically consistent compositional model of Earth's core / J. Badro, A.S. Côté, J.P. Brodholt // Proceedings of the National Academy of Sciences of USA. – 2014. – № 111,21. – С. 7542–7545.

16. Biot M.A. Mechanics of Incremental Deformation / M.A. Biot. – New York: Wiley, 1965. – 504 с.

17. Dziewonski A.M. Preliminary reference Earth model / A.M. Dziewonski, D.L. Anderson // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1981. – № 25, 4. – С. 297–356.

18. Eringen A.C. Elastodynamics. Vol I: Finite motion. Vol II: Linear theory / A.C. Eringen, E.S. Suhubi. – New York: Academic Press, 1974, 1975. – 1018 с.

19. Guliyev H.H. Analysis of the physical parameters of the Earth's inner core within the mechanics of the deformable body / H.H. Guliyev // Transactions of NAS of Azerbaijan, Issue Mechanics, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences. – 2016. – № 36, 7. – С. 19–30.

20. Guliyev H.H. Analysis of results of interpretation of elastic parameters of solid core of the Earth from the standpoint of current geomechanics / H.H. Guliyev // Geophysical Journal. – 2017. – № 39, 1. – С. 79–96.

21. Guz A.N. Fundamentals of the three-dimensional theory of stability of deformable bodies / A.N. Guz. – Berlin: Springer, 1999. – 557 с.

22. Helffrich G. Outer-core compositional stratification from observed core wave speed profiles / G. Helffrich, S. Kaneshima // Nature. – 2010. – № 468, 7325. – С. 807–810.

23. <https://ds.iris.edu/spud/earthmodel>. Access mode  
24. Kennett B.L.N. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes / B.L.N. Kennett, E.R. Engdahl, R. Buland // Geophysical Journal International. – 1995. – № 122, 1. – С. 108–124.

25. Kono Y. Sound velocities of MORB and absence of a basaltic layer in the mantle transition region / Y. Kono, T. Irifune, H. Ohfuji, Y. Higo, K.-I. Funakoshi // Geophysical Research Letters. – 2012. – № 39. – С. L24306.

26. Kuliev G.G. To elastic waves propagation in strained nonlinear anisotropic media / G.G. Kuliev, M.J. Jabbarov // Proceedings of the ANAS, Earth Sciences. – 1998. – № 2. – С. 103–112.

27. Li X. The influence of initial stress on wave propagation and dynamic elastic coefficients / X. Li, M. Tao // Geomechanics and Engineering An International Journal. – 2015. – № 8, 3. – С. 377–390.

28. Liu J. Abnormal acoustic wave velocities in basaltic and (Fe,Al)-bearing silicate glasses at high pressures / J. Liu, J.-F. Lin // Geophysical Research Letter. – 2014. – № 41. – С. 8832–8839.

29. Mao Z. Sound velocities of hydrous ringwoodite to 16 GPa and 673 K / Z. Mao, J.-F. Lin, S.D. Jacobsen, T.S. Duffy, Y.-Y. Chang, J.R. Smyth, D.J. Frost, E.H. Hauri, V.B. Prakapenka // Earth and Planetary Science Letters. – 2012. – № 331–332. – С. 112–119.

30. Mao Z. Sound velocities of Fe and Fe-Si alloy in the Earth's core / Z. Mao, J.-F. Lin, J. Liu, A. Alatas, L. Gao, J. Zhao, H.-K. Mao // Proceedings of the National Academy of Sciences of USA. – 2012. – № 109, 26. – С. 10239–10244.

31. Nimmo F. Energetics of the Core", (8<sup>th</sup> Volume), In: Treatise on Geophysics, (2<sup>nd</sup> Edition), (Edited by Schubert G.) / F. Nimmo. – Oxford: Elsevier, 2015. – С. 27–55.

32. Ohtani E. Sound velocity of hexagonal close-packed iron up to core pressures / E. Ohtani, Y. Shibazaki, T. Sakai, K. Mibe, H. Fukui, S. Kamada, T. Sakamaki, Y. Seto, S. Tsutsui, A.Q. Baron // Geophysical Research Letter. – 2013. – № 40, 19. – С. 5089–5094.

33. Prescher C. High Poisson's ratio of Earth's inner core explained by carbon alloying / C. Prescher, L. Dubrovinsky, E. Bykova, I. Kupenko, K. Glazyrin, A. Kantor, C. VcCammon, M. Mookherjee, Y. Nakajima, N. Miyajima // Nature Geoscience. – 2015. – № 8, 3. – С. 220–223.

34. Sumita I. Inner-Core Dynamics", (8<sup>th</sup> Volume), In: Treatise on Geophysics, (Eited by Schubert, G.) / I. Sumita, M.I. Bergman. – Oxford: Elsevier, 2007. – С. 297–316.

35. Tao M. Theoretical and numerical analysis of the influence of initial stress gradient on wave propagations / M. Tao, Z. Chen, X. Li, H. Zhao, T. Yin // Geomechanics and Engineering An International Journal. – 2016. – № 10, 3. – С. 285–296.

36. Tateno S. The Structure of Iron in Earth's Inner Core / S. Tateno, K. Hirose, Y. Ohishi, Y. Tatsumi // Science. – 2010. – № 330. – С. 359–361.

37. Thurston R. Third-order elastic constants and velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media / R. Thurston, K. Brugger // Physical Review. – 1964. – № 133, 6A. – С. 1604–1610.

38. [www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780444538031](http://www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780444538031).

[Електроний ресурс].

#### References

1. Aleksandrov, K.S., Prodayvoda, G.T., Maslov B.P. (2001). Method for determining nonlinear elastic properties of rocks. Doklady akademii nauk, 380, 1, 109–112. [In Russian].
2. Bullen, K.E. (1978). The Earth's Density. M.: Mir, 422 p. [In Russian].



3. Vyzhva, S.A., Maslov, B.P., Prodayvoda, G.T. (2005). Effective elastic properties of nonlinear multi-component geological media. *Geophysical Journal*, 27, 6, 1012–1022. [In Russian].
4. Guz, A.N. (1986). *Elastic waves in bodies with initial stresses*, (2<sup>nd</sup> Volume). K.: Naukova dumka, 916 p. [In Russian].
5. Guz, A.N. (2004). Elastic waves in bodies with initial (residual) stress. K.: A.C.K., 672 p. [In Russian].
6. Kuliev, G.G., Jabbarov, M.J. (2000). Amplitude characteristics of elastic waves in stressed medium. *Doklady Russian Academy of Sciences*, 370, 4, 672–674. [In Russian].
7. Maslov, B.P., Prodayvoda, G.T. (1998). Dispersion and scattering of elastic waves in a fractured geological medium. *Geophysical Journal*, 20, 2, 47–55. [In Russian].
8. Prodayvoda, G.T., Vyzhva, S.A., Vershilo, I.V. (2012). Mathematical modeling of effective geophysical parameters. K.: Vidavnichno-poligrafichnyi tsentr "Kiivskiy universitet, 287 p. [In Ukrainian].
9. Prodayvoda, G.T., Omelchenko, V.D., Maslov, B.P. (2004). Seismomineralogical model of the Earth's crust of the Ukrainian Shield. *Geophysical Journal*, 26, 4, 100–107. [In Russian].
10. Truesdell, K. (1975). *A first course in rational continuum mechanics*. Moscow: Mir, 592 p. [In Russian].
11. Akbarov, S.D. (2015). *Dynamics of Pre-Strained Bi-Material Elastic Systems: Linearized Three-Dimensional Approach*. Switzerland: Springer, 1004 p.
12. Anderson, D.L. (2007). *New Theory of the Earth*. New York: Cambridge University Press, 400 p.
13. Anderson, O.L. (1995). *Equations of State of Solids for Geophysics and Ceramic Science*. New York: Oxford University Press, 432 p.
14. Antonangeli, D., Ohtani, E. (2015). Sound velocity of hcp-Fe at high pressure: experimental constraints, extrapolations and comparison with seismic models. *Progress in Earth Planetary Science*, 2, 3, 1–11.
15. Badro, J., Côté, A.S., Brodholt, J.P. (2014). A seismologically consistent compositional model of Earth's core. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 111, 21, 7542–7545.
16. Biot, M.A. (1965). *Mechanics of Incremental Deformation*. New York: Wiley, 504 p.
17. Dziewonski, A.M., Anderson, D.L. (1981). Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 4, 297–356.
18. Eringen, A.C., Suhubi, E.S. *Elastodynamics*. Vol I: Finite motion (1974). Vol II: Linear theory (1975). New York: Academic Press, 1018 p.
19. Guliyev, H.H. (2016). Analysis of the physical parameters of the Earth's inner core within the mechanics of the deformable body. *Transactions of NAS of Azerbaijan, Issue Mechanics, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences*, 36, 7, 19–30.
20. Guliyev, H.H. (2017). Analysis of results of interpretation of elastic parameters of solid core of the Earth from the standpoint of current geomechanics. *Geophysical Journal*, 39, 1, 79–96.
21. Guz, A.N. (1999). *Fundamentals of the three-dimensional theory of stability of deformable bodies*. Berlin: Springer, 557 p.
22. Helffrich, G., Kaneshima, S. (2010). Outer-core compositional stratification from observed core wave speed profiles. *Nature*, 468, 7325, 807–810.
23. Access mode: <https://ds.iris.edu/spud/earthmodel>
24. Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R., Buland, R. (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International*, 122, 1, 108–124.
25. Kono, Y., Irifune, T., Ohfuji, H., Higo, Y., Funakoshi, K.-I. (2012). Sound velocities of MORB and absence of a basaltic layer in the mantle transition region. *Geophysical Research Letters*, 39, L24306.
26. Kuliev, G.G., Jabbarov, M.J. (1998). To elastic waves propagation in strained nonlinear anisotropic media. *Proceedings of the ANAS, Earth Sciences*, 2, 103–112.
27. Li, X., Tao, M. (2015). The influence of initial stress on wave propagation and dynamic elastic coefficients. *Geomechanics and Engineering An International Journal*, 8, 3, 377–390.
28. Liu, J., Lin, J.-F. (2014). Abnormal acoustic wave velocities in basaltic and (Fe,Al)-bearing silicate glasses at high pressures. *Geophysical Research Letters*, 41, 8832–8839.
29. Mao, Z., Lin, J.-F., Jacobsen, S.D., Duffy, T.S., Chang, Y.-Y., Smyth, J.R., Frost, D.J., Hauri, E.H., Prakapenka, V.B. (2012). Sound velocities of hydrous ringwoodite to 16 GPa and 673 K. *Earth and Planetary Science Letters*, 331–332, 112–119.
30. Mao, Z., Lin, J.-F., Liu, J., Alatas, A., Gao, L., Zhao, J., Mao, H.-K. (2012). Sound velocities of Fe and Fe-Si alloy in the Earth's core. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 109, 26, 10239–10244.
31. Nimmo, F. (2015). *Energetics of the Core*, (8<sup>th</sup> Volume), In: *Treatise on Geophysics*, (2<sup>nd</sup> Edition), (Edited by Schubert G.). Oxford: Elsevier, 27–55.
32. Ohtani, E., Shibasaki, Y., Sakai, T., Mibe, K., Fukui, H., Kamada, S., Sakamaki, T., Seto, Y., Tsutsui, S., Baron, A.Q. (2013). Sound velocity of hexagonal close-packed iron up to core pressures. *Geophysical Research Letters*, 40, 19, 5089–5094.
33. Prescher, C., Dubrovinsky, L., Bykova, E., Kuppenko, I., Glazyrin, K., Kantor, A., VcCammon, C., Mookherjee, M., Nakajima, Y., Miyajima, N. (2015). High Poisson's ratio of Earth's inner core explained by carbon alloying. *Nature Geoscience*, 8, 3, 220–223.
34. Sumita, I., Bergman, M.I. (2007). *Inner-Core Dynamics*, (8<sup>th</sup> Volume), In: *Treatise on Geophysics*, (Edited by Schubert, G.). Oxford: Elsevier, 297–316.
35. Tao, M., Chen, Z., Li, X., Zhao, H., Yin, T. (2016). Theoretical and numerical analysis of the influence of initial stress gradient on wave propagations. *Geomechanics and Engineering An International Journal*, 10, 3, 285–296.
36. Tateno, S., Hirose, K., Ohishi, Y., Tatsumi, Y. (2010). The Structure of Iron in Earth's Inner Core. *Science*, 330, 359–361.
37. Thurston, R., Brugger, K. (1964). Third-order elastic constants and velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media. *Physical Review*, 133, 6A, 1604–1610.
38. Access mode: [www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780444538031](http://www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780444538031).

Надійшла до редколегії 15.06.17

Г. Кулієв, д-р фіз.-мат. наук, проф., акад. НАНА  
E-mail: [hatamguliyev@gmail.com](mailto:hatamguliyev@gmail.com), тел.: (+994 12) 5105617  
Інститут геології та геофізики НАН Азербайджану  
Відділ "Тектонофізика і геомеханіка"  
пр. Г. Джавида, 119, Баку, AZ1143, Азербайджан

## ПРО ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ В ІЗОТРОПНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ЗА ВИСОКИХ І НАДВИСОКИХ ТИСКІВ

*Дослідження питань поширення пружних хвиль у геологічному середовищі становлять наукову основу обробки та інтерпретації комплексу даних сейсморозвідувальних і сейсмологічних робіт.*

*Мета. Створення більш обґрунтованої теоретичної бази геомеханічної інтерпретації різних груп геофізичних спостережених та експериментальних даних.*

*Методика. Некласично-лінеаризований підхід нелінійної еластодинаміки. Ураховуються лінійні та нелінійні малі й великі початкові деформації. Процеси деформації описуються за допомогою різних пружних потенціалів.*

*Результати. У межах різних варіантів теорії малих і початкових деформацій із застосуванням квадратичного і Мурнаганського типів пружних потенціалів отримано аналітичні залежності параметра тиску і швидкостей поширення пружних хвиль від деформації без додаткової лінеаризації.*

*Наукова новизна. Установлено, що існують критичні величини деформації, при досягненні яких в однорідно деформованих пружних ізотропних середовищах не можуть поширюватися пружні поздовжні й поперечні хвилі з речовинною швидкістю. Кількісні значення критичних величин деформації для поздовжніх і поперечних хвиль відрізняються та істотно залежать від застосованих пружних потенціалів.*

*Практична значимість. Отримані аналітичні залежності дозволяють синтезувати справжні величини пружних параметрів деформованих середовищ з комплексу сейсморозвідувальних і сейсмологічних даних. Установлення критичних деформацій для швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль дозволить запропонувати диференційні критерії щодо розподілу пружних параметрів у теоретичних моделях Землі загалом і окремо в її різних структурних елементах.*

*Ключові слова: нелінійна еластодинаміка, пружні хвилі, початкова деформація, швидкості поздовжніх і поперечних хвиль.*

Г. Кулиев, д-р физ.-мат. наук, проф., акад. НАНА  
E-mail: hatamgulyev@gmail.com, тел.: (+994 12) 5105617  
Институт Геологии и Геофизики НАН Азербайджана  
Отдел "Тектонофизика и геомеханика"  
пр. Г. Джавида, 119, Баку, AZ1143, Азербайджан

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ ПРИ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

*Исследования вопросов распространения упругих волн в геологической среде составляют научную основу обработки и интерпретации комплекса данных сейсморазведочных и сейсмологических работ.*

*Цель. Создание более обоснованной теоретической базы геомеханической интерпретации различных групп геофизических наблюдений и экспериментальных данных.*

*Методика. Неклассически-линеаризированный подход нелинейной эластодинамики. Учитываются линейные и нелинейные малые и большие начальные деформации. Процессы деформации описываются с помощью различных упругих потенциалов.*

*Результаты. В рамках различных вариантов теории малых и начальных деформаций с применением квадратичного и Мурнаганского типов упругих потенциалов получены аналитические зависимости параметра давления и скоростей распространения упругих волн от деформаций без дополнительной линеаризации.*

*Научная новизна. Установлено, что существуют критические величины деформации при достижении которых в однородно деформированных упругих изотропных средах не могут распространяться упругие продольные и поперечные волны с вещественной скоростью. Количественные значения критических величин деформаций для продольных и поперечных волн отличаются и существенным образом зависят от применяемых упругих потенциалов.*

*Практическая значимость. Полученные аналитические зависимости позволяют синтезировать истинные величины упругих параметров деформированных сред из комплекса сейсморазведочных и сейсмологических данных. Установление критических деформаций для скоростей продольных и поперечных волн позволит предложить дифференциальные критерии по распределению упругих параметров в теоретических моделях Земли в целом и в отдельности в ее различных структурных элементах.*

*Ключевые слова: нелинейная эластодинамика, упругие волны, начальная деформация, скорости продольных и поперечных волн.*

УДК 550.382.3

А. Меньшов, канд. геол. наук, докторант

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

А. Сухорада, канд. геол.-минерал. наук, доц.

E-mail: suhorada@univ.kiev.ua

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, Киев, 03022, Украина

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ И МЕТОДОЛОГИИ ГЕОФИЗИКИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

*(Рекомендовано членом редакционной коллегии д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком)*

*Магнитометрический раздел геофизики педосферы (почвенной оболочки Земли) является наиболее развитым относительно своей теории и методологии в контексте практического применения. Выделяются три основные задачи, стоящие перед педомагнитологией и касающиеся человечества. Это наращивание ресурсной базы, мониторинг состояния окружающей среды, углубленное изучение почвенного покрова в связи с его деградацией и необходимостью повышения продуктивности сельскохозяйственных земель. Почвенный покров является прямым отражением процессов, происходящих на контакте литосферы и атмосферы. Существуют два типа почвенного покрова. Это почвы с остаточным магнетизмом, магнитные свойства которых определяются литогенной основой и процессами ее выветривания. Роль таких почв в практической педомагнитологии на данный момент до конца неясна. Детальнее изучены почвы с педогенным генезисом магнитного сигнала, магнитные минералы которых сформировались в процессе развития почвенного профиля. Ведущую роль в формировании их магнитных свойств играют окислы и гидроокислы железа, в некоторых случаях сульфиды железа. Магнитная модель почвенного разреза может существенно изменяться под влиянием антропогенных и техногенных факторов. Магнитные параметры изменяются под воздействием выбросов транспорта, промышленных предприятий, теплостанций и т.д. Рельефообразование, форсируя плоскостной смыл, может существенно изменять соотношение между почвенными генетическими горизонтами. Также известны случаи, когда магнитные минералы осадочного происхождения образуются над залежами углеводородов под влиянием миграции их исходного флюида и могут изменять магнитные свойства почвы. Практическое применение этих моделей рассмотрено в статье на конкретных примерах.*

**Ключевые слова:** почва, магнетизм природных объектов, теория и методология, магнитная восприимчивость.

**Вступление.** Магнитометрический раздел геофизики педосферы [3] является на данном этапе наиболее развитым как в своей теоретической части, так и в практическом аспекте. Объясняется это в первую очередь высокой разрешающей способностью магнитного метода применительно к задачам изучения почвенного покрова. Именно он, в классическом определении, выступает зеркалом ландшафта, то есть хранилищем информации о процессах, происходящих на поверхности планеты, а иногда несущем данные о некоторых эндогенных событиях. Сегодня можно говорить о трех главных проблемах, стоящих перед педомагнитологией и вплотную касающихся человечества. Первое – это наращивание ресурсной базы [7], прежде всего сырья. Далее – мониторинг сохранности окружающей среды [10], а также углубленное изучение собственно почвенного покрова [14], особенно в связи с его деградацией и задачей повышения продуктивности земель [13]. Таким образом, нами комплексно рассматриваются все три проблемы, имеющие теоретическое и непосредственно практическое значение.

**Теория и методология.** Классический анализ любого геофизического метода сводится к решению двух основных задач геофизики – прямой и обратной. Кратко изложим их теоретические и методологические принципы для обобщающего разреза почвенного покрова Земли. Почвенный покров является прямым отражением процессов, происходящих на контакте литосферы и атмосферы. С одной стороны, тектоническая эволюция любого региона приводит в конечном счете к формированию литологической основы почвенного покрова, а соответственно создают и предпосылки для формирования собственно почвы. С другой стороны, тектонические движения, а в некоторой степени и сама литогенная основа, служат базисом для формирования исходных условий рельефа. Последнее определяет вертикальный разрез почвенного покрова и его динамику во времени. Следовательно, почвенный покров является обобщающей функцией двух главных составляющих. Первая – это эндогенная история Земли в точке наблюдения, а вторая – ее координаты, в первую очередь широта.

Отсюда, на территориях бурной тектонической деятельности, где превалирует роль магматических горных

пород, на первый план выходит высокая роль остаточных магнитных минералов. Такие ситуации известны для некоторых почв Грузии, Болгарии, Португалии и т.д. [1, 6, 15]. В более спокойных условиях, особенно высоких широт, ведущую роль для формирования магнитного облика почвенного покрова играют аккумулятивные процессы, смыл почвы, окислительно-восстановительный потенциал среды и некоторые другие процессы. В итоге формируются собственные почвенные минералы, в том числе и ферромагнитные.

Таким образом, можно говорить о двух типах почвенного покрова. Это почвы с реститовым (остаточным) магнетизмом, магнитные свойства которых определяются литогенной основой и процессами ее выветривания. Роль таких почв в практической педомагнитологии сегодня до конца неясна. Поэтому более детально рассмотрим почвы с педогенным магнитным сигналом, сформированным в процессе развития почвенного покрова. Ведущую роль в их магнитном облике играют окислы и гидроокислы железа, в некоторых случаях также сульфиды железа. При этом генерация магнитной компоненты происходит главным образом в верхней части почвенного разреза, содержащей гумус. В этих генетических горизонтах под влиянием биоты происходит трансформация железосодержащих минералов литогенного происхождения в упомянутые выше магнитные соединения. Педогенные магнетики чаще всего являются однодоменными (SD) и суперпарамагнитными (SP) фракциями. Их изучение проводится, начиная еще с работ Ле Бурже [5]. Известно, что важную роль играют термические преобразования – антропогенные и природные разогревы, например пожары [8]. В то же время, для так называемого археологического вещества существует связь с изменениями магнитных свойств почвы, что положено в основу использования педомагнетизма как инструмента археологических исследований [12].

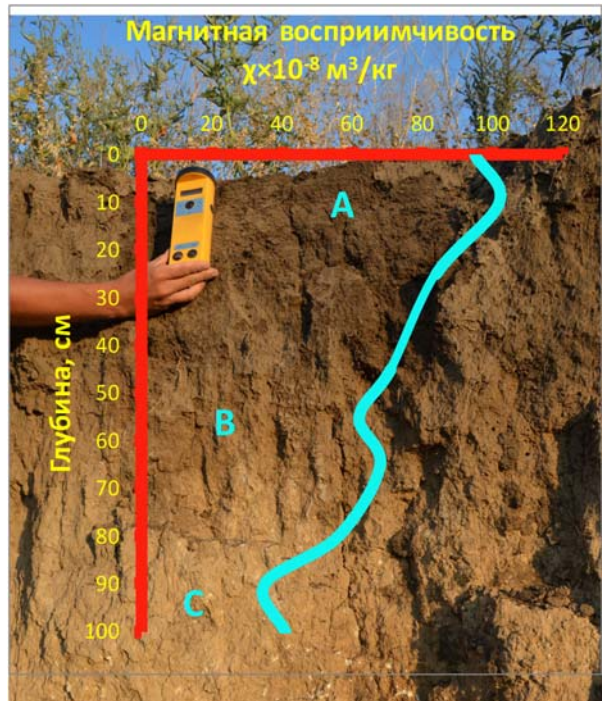
В основном вертикальная зональность магнитных характеристик обусловлена естественной эволюцией почвенного покрова, впервые четко обозначена Докучаевым и превосходно иллюстрирована неоднократно наблюдаемыми магнитными разрезами разных почв и

многими исследователями [4]. Как правило, более магнитные почвы обогащены гумусовыми фракциями, хорошо окислены и аэробны. При этом верхний гумусовый горизонт "А" по классификации WRB чаще всего является и наиболее магнитным как для современных почв, так и для палеопочв.

Рассмотренные выше закономерности строения магнитной модели почвенного разреза могут (иногда существенно) изменяться под влиянием антропогенных и техногенных факторов. Речь идет о повышении значений магнитных характеристик, что связано с выбросами транспорта, промышленных предприятий, теплэлект-

ростанций и т.д. Кроме того, рельефообразование, формируя плоскостной смыв, может существенно изменять соотношение между различными педомагнитными горизонтами. Это отмечалось еще удмуртской школой в их авторском свидетельстве, а позднее демонстрировалось на примерах для разных частей Земли.

**Примеры.** Можно сконструировать некую фоновую педомагнитную модель почвенного покрова (рис. 1). На рисунке представлен классический разрез чернозема Юга Украины. По классификации почв WRB и по магнитной восприимчивости мы выделили три генетических горизонта А, В, С.



**Рис. 1. Пример распределения магнитной восприимчивости с глубиной для условно фонового незагрязненного чернозема южного участка "Санжейка"**

Следует сказать, что величины магнитных параметров довольно высокие как для незагрязненных почв. Почвенный разрез состоит из следующих горизонтов. Верхний гумусовый А залегает на глубине 0–40 см: темно-серого цвета, структура мелкозернистая, на поверхности наблюдается мучнистая присыпка. Гумусовый переходный В1 залегает на глубине 40–70 см: с темно-коричневым оттенком, структура ореховидная, некоторые агрегаты остроконечные, плотный, переход к подстилающим породам резкий. Буровато-палевый плотный горизонт В2 залегает на глубине 70–85 см, по щелям визуализируется затекание гумуса. Следующий горизонт ВС залегает на глубине 85–130 см, большое содержание карбонатов в виде Белозерки. Подстилающий горизонт С на глубине 130–180 см: темно-палевый глинистый лес, на значительных глубинах встречаются кристаллы гипса. Разрез был заложен в непосредственной близости от обрыва с частичным использованием естественного обнажения. Верхний гумусовый горизонт А характеризуется высокой магнитной восприимчивостью  $80\text{--}100 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Ниже на глубине 40–70 см залегает переходный горизонт В с магнитной восприимчивостью  $70\text{--}80 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . На глубине более 80 см четко идентифицируется подстилающий материнский горизонт С с магнитной восприимчивостью  $30\text{--}40 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , состоящий из суглинистых пород. Отметим, что за счет естественного об-

нажения глубже 10 м мы отслеживали палеопочвы, которые в методологическом отношении являются важной составляющей для построения педомагнитных моделей.

Частотно зависимая магнитная восприимчивость  $\chi_{fd}$  в большинстве случаев для верхнего гумусового горизонта превышает 3–4 % и иногда достигает 10 %. Это говорит о превалировании суперпарамагнитных и однодоменных стабильных ультрадисперсных минералов педогенного происхождения.

Несколько повторяясь, подчеркнем важную роль для теоретического и практического земледелия следующих закономерностей. Решающим для определения плодородия почв и магнитных характеристик является количество и состав гумусовых фракций, сконцентрированных в пахотном слое (0–30 см). Именно детальное его изучение позволяет широко использовать педомагнитологию для решения экологических и аграрных задач.

Вместе с тем, использование реститового (остаточного) магнетизма почвенного покрова дает возможность применять метод для картирования кристаллического фундамента и рудных минералов (рис. 2). Приведенный рисунок позволил на примере площади "Хашчеватое – Завалье" идентифицировать несколько источников, которые являются причинами магнитных аномалий. В геологическом отношении эта площадь представлена вязким разломом в пределах вязкоразломной зоны.

Этот разлом нарушает гиперстен (с гранатом и биотитом), кристаллосланцы и гнейсы, гранитогнейсы (также с гранатом), жильные и гнездовидные тела пегматитов, кристаллы железосодержащих пород и др. [2].

Системная капаметрия коренных обнажений по поверхности указывает на значительную роль остаточных магнитных минералов в составе магнитной фракции почвенного покрова. Это влияние прослеживается в направлении водораздела и подтверждается специально выполненными почвенными разрезами. Эти разрезы доказывают, что остаточные магнитные минералы в почвах фиксируются лишь в случае формирования коры

выветривания кристаллических пород, как материнской подстилающей основы почвы. При этом результаты капаметрии как по коренным, так и по примитивным почвам достаточно близки.

Кроме зафиксированных в пределах обнаженной части территории евлизитов, фиксируется еще один сильно магнитный тектонодомен, залегающий на несколько большей глубине от физической поверхности и, вероятнее всего, не выходящий на поверхность кристаллического фундамента. Об этом свидетельствует отсутствие его проявления на карте магнитной восприимчивости почвенного покрова.



Рис. 2. Пример реститового магнетизма почвенного покрова при картировании кристаллического фундамента и рудных минералов на примере площади "Хщеватое – Завалье". (Основа рисунка взята из монографии [1])

Известны случаи, когда магнитные минералы осадочного происхождения образуются над залежами углеводородов под влиянием миграции их исходного флюида. Это способствует преобразованию и новообразованию ферромагнитных, парамагнитных и относительно немагнитных минералов. Как было показано, этот процесс охватывает и почвенный покров [9, 11]. Из этого следует, что для целей практической геологии почва может выступать ценным объектом, несущим эвристическую информацию. Речь идет о настоятельной необходимости вовлечения магнитных исследований в комплекс геологоразведки на нефть и газ, в первую очередь в ландшафтах аккумулятивного типа (рис. 3). Ландшафтные условия опытного участка "Старуня" больше похожи на соседнее Полесье. Горный массив располагается на расстоянии 10–20 км. Ландшафтный профиль включает локальные катены без значимых перепадов высот и сеть мелких рек и ручьев. Конечная часть профиля расположена в пределах леса, где отмечается существенный рост абсолютных высот. В геоморфологическом отношении участок "Старуня" включает равнинные местности, оползни, места эрозионной активности (как речной, так и почвенной), болота. В низменностях преобладают болотные и луговые почвы, а в пределах леса – серые лесные разновидности почв. Согласно данному примеру отметим, что вторая секция ландшафтного пересечения находится в пределах скважины "Надежда-1" и грязевого вулкана в зоне влияния углеводородов. Почвы с ви-

димыми признаками содержания углеводородов характеризуются повышением магнитной восприимчивости в 10–20 раз относительно фоновых значений, изменяется их магнитоминералогический состав. Первая секция является лесным ландшафтом с серыми лесными природными неизменными почвами (пикеты наблюдения 140–440 м.). Магнитная восприимчивость зависит больше от альтитуды точек наблюдения и составляет  $\chi = 20\text{--}45 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  для верхнего слоя почвы.

Вторая секция ландшафтного пересечения находится в окрестности пикетов 440–840 м. Это наиболее информативная участок в контексте исследования влияния углеводородов на магнетизм почв. Она находится вблизи мест природного вытока на поверхность углеводородов, а, следовательно, почвенный покров и подстилающие породы подверглись наибольшему воздействию процессов микропрорасачивания. Измененные почвы этого участка характеризуются магнитной восприимчивостью  $\chi = 20\text{--}50 \times 20\text{--}45 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Третья ландшафтная секция находится в пределах пикетов 940–1540 м. Она сложена системой микрокатен, однако переходы от локальных понижений к водоразделам незначительны, так как участок фактически является луговым. Луговые и болотные почвы, распространенные в этих пределах, не проявляют признаков насыщения углеводородными продуктами, верхний слой почвы характеризуется магнитной восприимчивостью  $\chi = 10\text{--}20 \times 20\text{--}45 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

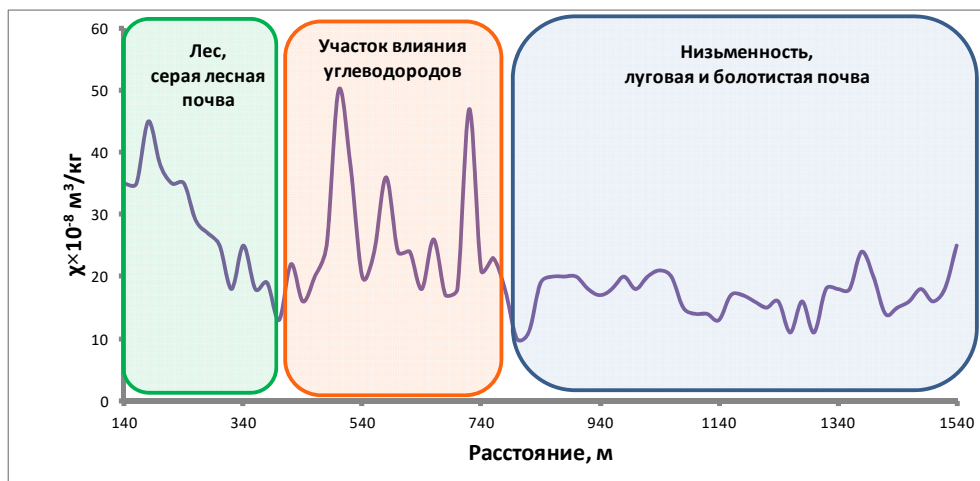


Рис. 3. Пример использования магнетизма почвенного покрова при картировании территории отложений углеводородов вдоль профиля MAG1 полигона "Старуня"

Возвратимся к использованию педомагнитологии как инструмента для решения экологических и аграрных задач. Необходимо подчеркнуть существенную роль глубокого понимания объекта исследований и важность всестороннего учета строения ландшафтов как фоновой характеристики. Например, для целого ряда ландшафтов Предкарпатья, Карпат, где широко распространены буроземы, а также в пределах болотистых местностей, крайне характерным является преваширование парамагнитных минералов в развитии почвы. Это связано с низким окислительным потенциалом среды. Для таких местностей практическое использование магнитных характеристик почв имеет ограниченное значение и слабо изучено. Вероятнее всего можно вести речь только об определенном потенциале магнетизма как инструмента экологических исследований, а также использовании магнитных свойств почв как индикатора ландшафта.

Следует отметить, что наибольшие перспективы практического использования педомагнитологии связаны с почвами, в которых хорошо развиты гумусовые горизонты, а степень их магнитности указывает на потенциальное плодородие (магнитная восприимчивость возрастает с ростом содержания гумуса). С другой стороны, деградация таких почв явно сказывается на их магнитных характеристиках и может четко фиксироваться при картировании эродированных почв, их засоленности, вторичной заболоченности и других опасных аграрных процессах.

**Выводы.** Подводя итоги, поставим акцент на особенностях теории и методологии применяемой в педомагнитологии. Специфичность объекта исследований, сравнительно с классическими геологическими объектами, проявляется в очень малой мощности почвенных горизонтов, низком уровне их намагниченности, значительных площадях исследований. Это ведет к невозможности использования классических геофизических подходов при магнитометрическом опробовании почвенного покрова. В тоже время разработана технология ультрадетального магнитного картирования, которая может применяться для исследования почв геофизическими методами.

Для конечного пользователя важным и интересным является новый элемент физических основ магнитного метода – высокая плотность сетки наблюдений, крупные территории опробований. Такие материалы фактически послужат основой для нового этапа картирования планеты – ее геологии, почвенных покровов, археологии. В любом случае в педомагнитологии уже сейчас сформированы основы ее теории, методологии, перспективы

практического использования во всех направлениях конверсионной геофизики: поисках минерального сырья, сохранении окружающей среды, экологически безупречной методики получения урожая.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 16БП049-02 "Наукові засади передумов нафтогазоносності сланцевих товщ і складнопобудованих порід-колекторів".

#### Список использованных источников

1. Вадюнина А.Ф. Магнитная восприимчивость некоторых почв Грузии // А.Ф. Вадюнина, В.Ф. Бабанин // VI делегатский съезд Всесоюзного общества почвоведов : тез. докл. – Тбилиси, 1981. – № 1. – С. 41–42.
2. Лукієнко О.І. Дислокаційна тектоніка та тектонофації докембрію Українського щита / О.І. Лукієнко, Д.В. Кравченко, А.В. Сухорада. – К. : ВПЦ Київський університет, 2008. – 280 с.
3. Сухорада А.В. Геофизика педосферы – проблемы и методология их решения / А.В. Сухорада, М.А. Сухорада // Мониторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища : тез. доп. IV міжнар. конф. – 2003. – С. 128–129.
4. BahiaClay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces / L.A. Camargo, J.M. Júnior, G.T. Pereira, A.S. Rabelo de Souza // Sci. agric. (Piracicaba, Braz.). – 2014. – № 71. – P. 3.
5. Leborgne E. Influence of fire on the magnetic properties of soil, of schist, and of granite / E. Leborgne // Annales de Geographie. – 1960. – № 16. – P. 159–195.
6. Lourenço A.M. Integration of magnetic measurements, chemical and statistical analysis in characterizing agricultural soils (central Portugal) / A.M. Lourenço, C.R. Gomes // Environmental Earth Sciences. – 2016. – № 75(11). – P. 1–17.
7. Magnetic enhancement caused by hydrocarbon migration in the Mawangmiao Oil Field, Jiangnan Basin China / Q. Liu, L. Chan, T. Yang, X. Xia, T. Cheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2006. – № 53. – P. 25–33.
8. Magnetic enhancement in wildfire-affected soil and its potential for sediment-source ascription / W.H. Blake, P.J. Wallbrink, S.H. Doerr, R.A. Shakesby, G.S. Humphreys // Earth Surface Processes and Landforms. – 2006. – № 31(2). – P. 249–264.
9. Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine / O. Menshov, R. Kudeavets, S. Vyzhva, I. Chobotok, T. Pastushenko // Studia Geophysica et Geodaetica. – 2015. – № 59(4). – P. 614–627.
10. Magnetic screening of a pollution hotspot in the Lausitz area, Eastern Germany: correlation analysis between magnetic proxies and heavy metal contamination in soils / C. Spiteri, V. Kalinski, W. Rosler, V. Hoffmann, E. Appel // Environ Geol. – 2005. – № 49. – P. 1–9.
11. Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine) / O. Menshov, R. Kuderavets, S. Vyzhva, V. Maksymchuk, I. Chobotok, T. Pastushenko // Studia Geophysica et Geodaetica. – 2016. – № 60(4). – P. 731–746.
12. Rockmagnetic correlation between Holocene cave sediments at the mountain and loess soil deposits in Piedmont Crimea (on example of the trap cave Emine-Bair-Khosar and archaeological site Biyuk-Karasu-XIX) / K. Bondar, B. Ridush, Z. Matviishyna, V. Stepanchuk // Georeview. Scientific Annals of Stefan cel Mare University of Suceava. Geography Series. – 2014. – № 24(2). – P. 8–10.
13. Royall D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain / D. Royall // Catena. – 2001. – № 46(1). – P. 15–34.

14. Shi R. Magnetic survey of topsoils in Windsor-Essex County, Canada / R. Shi, M.T. Cioppa // *Journal of Applied Geophysics*. – 2006. – № 60(3). – P. 201–212.

15. Soil tillage erosion by using magnetism of soils – a case study from Bulgaria / D. Jordanova, N. Jordanova, A. Atanasova, T. Tsacheva, P. Petrov // *Environ. Monit. Assess.* – 2011. – № 183. – P. 381–394.

#### References

1. Vadunina, A.F., Babanin, V.F. (1981). Magnitnaya vospriimchivost' nekotorykh pochv Gruzii. VI *delegatskiy syezd Vsesoyuznogo obshchestva pochvedov: tezisy dokladov, Tbilisi*, 1, 41–42. [In Russian].

2. Lukienko, O.I., Kravchenko, D.V., Sukhorada, A.V. (2008). Dyslokaciynna tektonika ta tektonofacii dokembriyu Ukrainського schita. K.: VPC Kyivskiy universitet, 280 p. [In Ukrainian].

3. Sukhorada, A.V., Sukhorada, M.A. (2003). Geofizika pedosfery – problem I metodologia ih reshenia. *Tezy Dopovidey IV mijnarodnoi konferencii "Monotoryng nebezpechnykh geologichnykh procesiv ta ekologichnogo stanu seredovisha"*. Kyiv, 128–129. [In Russian].

4. Camargo, L.A., Júnior, J.M., Pereira, G.T. Rabelo de Souza, A.S. (2014). Bahia Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*, 71, 3.

5. Leborgne, E. (1960). Influence of fire on the magnetic properties of soil, of schist, and of granite. *Annales de Geographie*, 16, 159–195.

6. Lourenço, A.M., Gomes, C.R. (2016). Integration of magnetic measurements, chemical and statistical analysis in characterizing agricultural soils (central Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 75(11), 1–17.

7. Liu, Q., Liu, Q., Chan, L., Yang, T., Xia, X., Cheng, T. (2006). Magnetic enhancement caused by hydrocarbon migration in the Mawangmiao Oil Field., Jiangnan Basin China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 53, 25–33.

8. Blake, W.H., Wallbrink, P.J., Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Humphreys, G.S. (2006). Magnetic enhancement in wildfire-affected soil and its potential for sediment-source ascription. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2), 249–264.

9. Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59(4), 614–627.

10. Spiteri, C., Kalinski, V., Rosler, W., Hoffmann, V., Appel, E. (2005). Magnetic screening of a pollution hotspot in the Lausitz area, Eastern Germany: correlation analysis between magnetic proxies and heavy metal contamination in soils. *Environ Geol.*, 49, 1–9.

11. Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk V., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(4), 731–746.

12. Bondar, K., Ridush, B., Matviishyna, Z., Stepanchuk, V. (2014). Rockmagnetic correlation between Holocene cave sediments at the mountain and loess soil deposits in Piedmont Crimea (on example of the trap cave Emine-Bair-Khosar and archaeological site Biyuk-Karasu-XIX). *Georeview. Scientific Annals of Stefan cel Mare University of Suceava. Geography Series*, 24(2), 8–10.

13. Royall, D. (2001). Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. *Catena*, 46(1), 15–34.

14. Shi, R., Cioppa, M.T. (2006). Magnetic survey of topsoils in Windsor-Essex County, Canada. *Journal of Applied Geophysics*, 60(3), 201–212.

15. Jordanova, D., Jordanova, N., Atanasova, A., Tsacheva, T., Petrov, P. (2011). Soil tillage erosion by using magnetism of soils – a case study from Bulgaria. *Environ. Monit. Assess.*, 183, 381–394.

Надійшла до редколегії 01.10.17

O. Menshov, PhD (Geol.), Doctoral Student  
E-mail: menshov.o@ukr.net,  
A. Sukhorada, PhD (Geol.-Min.), Assoc. Prof.  
Taras Shevchenko National University of Kyiv  
Institute of Geology, 90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

## BASIC THEORY AND METHODOLOGY OF SOIL GEOPHYSICS: THE FIRST RESULTS OF APPLICATION

*The magnetometric part of the geophysics of the pedosphere is the most developed one in its theoretical and practical aspects. We talk about three main problems facing pedomagnetology and humanity. This is an increase in the resource base, environment monitoring, and deep soil study, especially land degradation and productivity. The soil is a direct reflection of the processes occurring at the contact of the lithosphere and the atmosphere. There are two types of soils. The soils with residual magnetism have the magnetic properties related to their lithogenic base and processes of weathering. Much more investigated are the soils with the pedogenic magnetic signal origin. The iron oxides, hydroxides, and sometimes iron sulphides play the leading role in their magnetic behavior. The magnetic model of the soil horizons can significantly change under the anthropogenic and technogenic impact. Magnetic contrasts are associated with emission of vehicle, industrial enterprises, and power plants. Relief formation forces the slope erosion. These processes of change are related to the differentiation between soil horizons and soil magnetic properties. There are cases when magnetic minerals of sedimentary origin are formed above hydrocarbon deposits under the influence of fluid migration, which change the magnetic properties of the soil. The practical cases are considered in the examples.*

**Keywords:** soil, environmental magnetism, theory and methodology, magnetic susceptibility.

O. Меньшов, канд. геол. наук, докторант  
E-mail: menshov.o@ukr.net,  
A. Сухорада, канд. геол.-минерал. наук, доц.  
E-mail: suhorada@univ.kiev.ua  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

## ОСНОВИ ТЕОРІЇ І МЕТОДОЛОГІЇ ГЕОФІЗИКИ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ: ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

*Магнітометричний розділ геофізики педосфери (ґрунтової оболонки Землі) є найбільш розвиненим щодо своєї теорії та методології в контексті практичного застосування. Виділяються три основні завдання, що стоять перед педомагнітологією і стосуються людства. Це нарощування ресурсної бази, моніторинг стану навколишнього середовища, поглиблене вивчення ґрунтового покриву у зв'язку з його деградацією і необхідністю підвищення продуктивності сільськогосподарських земель. Ґрунтовий покрив є прямим відображенням процесів, що відбуваються на контакт літосфери та атмосфери. Існують два типи ґрунтового покриву. Це ґрунти із залишковим магнетизмом, магнітні властивості яких визначаються літогенною основою і процесами її вивітрювання. Роль таких ґрунтів у практичній педомагнітології на сьогодні остаточно не визначена. Детальніше вивчено ґрунти з педогенним генезисом магнітного сигналу, магнітні мінерали яких сформувалися в процесі розвитку ґрунтового профілю. Провідну роль у формуванні їхніх магнітних властивостей відіграють оксиди і гідроксиди заліза, в деяких випадках сульфід заліза. Магнітна модель ґрунтового розрізу може істотно диференціюватися під впливом антропогенних і техногенних чинників. Магнітні параметри змінюються за рахунок викидів транспорту, промислових підприємств, теплоелектростанцій і т. ін. Рельєфоутворення, форсуючи площинний змив, може істотно змінювати співвідношення між ґрунтовими генетичними горизонтами. Також відомі випадки, коли магнітні мінерали осадового походження утворюються над покладами вуглеводнів під впливом міграції вихідного флюїду і можуть змінювати магнітні властивості ґрунтів. Практичне застосування цих моделей розглянуто в статті на конкретних прикладах.*

**Ключові слова:** ґрунти, магнетизм природних об'єктів, теорія і методологія, магнітна сприйнятливість.

УДК 550:837

Б. Ширков, канд. геол. наук, геофіз. І кат.  
bog\_dan90@ukr.net,  
Т. Бурахович, д-р геол. наук, пров. наук. співроб.  
burahovich@ukr.net  
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України  
пр. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03680, Україна

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕТОДИ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ РУДОПРОЯВІВ КОРИСНИХ КОПАЛИН

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)

Мета роботи полягає у вивченні зв'язків електропровідності з геодинамікою, металогенічними і структурними особливостями геологічного середовища. Методи: тривимірне геоелектричне моделювання геологічного середовища за допомогою програми Mtd3fwd R.L. Maskie на основі даних магнітотелуричного зондування (МТЗ) і магнітоваріаційного профілювання (МВП). Виявлено аномалії високої електропровідності з  $\rho = 2\text{--}250$  Ом м у земній корі, які збігаються з глибинними зонами розломів: Тальнівською, Первомайською, Врадіївською, Гвоздавською, Звенигородсько-Братською, Смілянською, Субботско-Мошоринською. Ці аномалії до глибин 2,5 км представлені субвертикальними структурами, а глибше – в основному субгоризонтальними шарами. Поза Голованівською шовною зоною (ГШЗ) спостерігається неоднорідна земна кора і верхня мантія у вигляді регіональних Чернівецько-Коростенської та Кіровоградської аномалій електропровідності. Низькоомні аномалії приурочені до протяжних смуг і областей поширення графітованих порід і зон метасоматозу вздовж зон розломів. В їхніх межах є більшість відомих в регіоні родовищ і рудопроявів рудних корисних копалин. Вузли перетину систем розломів різного напрямку є головними рудокалізуючими в ГШЗ, в яких відбувалися активні геодинамічні процеси, а також магматична і постмагматична гідротермально-метасоматична діяльність. З останньою пов'язано утворення рудоносних метасоматитів, у тому числі із сульфідною і графітовою мінералізацією. ГШЗ є перспективною на виявлення нових родовищ заліза, благородних і радіоактивних металів та їхніх супутніх елементів, графіту, рідкісних металів. Уперше для ГШЗ показано просторовий зв'язок аномалій електропровідності з родовищами і рудопроявами корисних копалин. Отриманий розподіл електропровідності в земній корі та верхній мантії ГШЗ може використовуватися при побудові глибинних геологічних і геотектонических моделей, прогнозних металогенічних карт і схем Українського щита (УЩ), а також для пояснення геодинамічних процесів регіону.

Ключові слова: Голованівська шовна зона, 3D геоелектрична модель, електромагнітні методи, глибинна будова, рудопрояви.

**Вступ.** Використання методів МТЗ і МВП з метою дослідження рудних геологічних об'єктів і процесів є доцільним, оскільки розширює коло завдань, що можуть бути вирішені при пошуках і розвідці рудних родовищ [4, 11, 18].

Просторово абсолютна більшість родовищ рудних корисних копалин на території центральної частини УЩ потрапляє в області аномалій підвищеної електропровідності [9, 17]. Виходячи з характеру локалізації родовищ і рудопроявів корисних копалин, виділено ряд металогенічних зон [5]:

1 – охоплює ГШЗ – це зона залізородних родовищ, переважно карбонатно-залізисто-кременисто-метабазитової формації й родовищ залізисто-кременистої формації. Зона містить родовища графіту, хрому і нікелю, родовища і рудопрояви урану і золота в лужних метасоматитах, кобальту, платиноїдів;

2 – зона, яка, імовірно, займає простір між Первомайською глибинною зоною розломів (ЗР) на заході й трансрегіональним тектонічним швом Херсон – Смоленськ на сході. Вона містить родовища урану калієво-уранової формації в окварцованих пегматитових жилах і прояви літєвих пегматитів;

3 – зона ураноносних альбітитів, золоторудних рудопроявів, пов'язаних з регіональним лужним метасоматозом, яка розташована від розмежувальної лінії на заході до глибинної Кіровоградської ЗР. До неї приурочені дайки кімберлітів і неалмазоносних проявів лужно-ультраосновного магматизму;

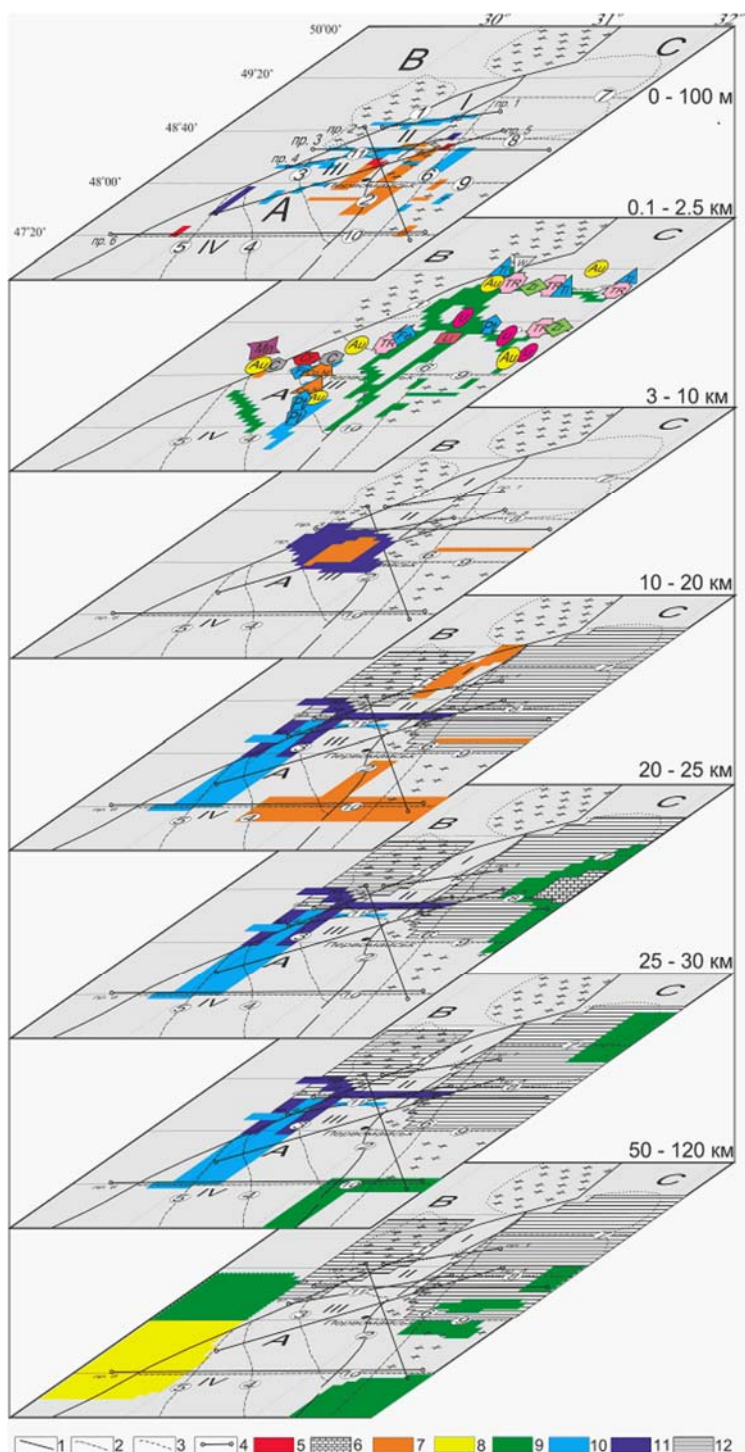
4 – область Інгулецько-Криворізької шовної зони. Це район поширення залізородних родовищ переважно залізисто-кременистої формації й карбонатно-залізисто-

кременисто-метабазитової формації. Вона містить родовища графіту, ураноносних конгломератів, рудовияви вольфраму, колчеданних проявів поліметалів і перспективні концентрації германію.

На основі особливостей глибинної будови в ГШЗ авторами [16] прогноуються нові родовища заліза, рудні вузли і рудні поля радіоактивних металів (уран і торій) і супутніх елементів у районі Первомайського розлому, Синицівсько-Савранської зони і Липовенківсько-Капітанського рудного району. Одним із критеріїв, на яких ґрунтується це прогнозування, є те, що природа аномалій підвищеної електропровідності обумовлена наявністю асоціації мінералів (сульфідів, графіту) у зонах метасоматичної проробки порід, що ведуть до утворення рудної мінералізації (уран, золото, рідкісні метали) [8] на глибинах перших кілометрів від поверхні, а також графітизацією внаслідок регіонального метаморфізму. Аномалії підвищеної електропровідності в земній корі на глибинах 5–30 км і у верхах верхньої мантії (50–120 км) найімовірніше відображають сліди впливу сучасних мантійних флюїдів.

У роботі [17] наведено результати тривимірного геоелектричного моделювання ГШЗ. Побудова 3D моделі (рис. 1) була здійснена на основі аналізу магнітоваріаційних параметрів поля геомагнітних варіацій ( $T = 150$  С), типперів і кривих МТЗ у діапазоні періодів магнітотелуричного поля до 1000–16000 с загалом у 134 пунктах; огляд, систематизація і аналіз цих даних наведені в роботах [3, 5]. Отриманий розподіл позірної електропровідності ( $\rho_n$ ) дав можливість виділити зони аномально високої й низької електропровідності.





**Рис. 1. Тривимірна геоелектрична модель ГШЗ**

Умовні позначення: А – Голованівська шовна зона; В – Росинсько-Бузький мегаблок; С – Інгульський мегаблок. Блоки ГШЗ:

I – Лисянський, II – Ятранський, III – Голованівський, IV – Тилігульський. Осьові лінії глибинних зон розломів:

1 – першого порядку (1 – Тальнівська, 2 – Первомайська), 2 – другого порядку (3 – Врадіївська, 4 – Гвоздавська, 5 – Одеська, 6 – Звенигородсько-Братська, 7 – Смілянська, 8 – Субботсько-Мошоринська, 9 – Бобринецька, 10 – Конкська, 11 – Ємилівська); 3 – межі блоків ГШЗ різного складу; 4 – лінії профілів МТЗ; 5–12 – зони з питомим опором: 5 – 2 Ом·м; 6 – 5 Ом·м; 7 – 10 Ом·м; 8 – 25 Ом·м; 9 – 50 Ом·м; 10 – 100 Ом·м; 11 – 250 Ом·м; 12 – 10 000 Ом·м

З поверхні виявлено велику кількість аномалій з питомим опором  $\rho = 2-250$  Ом·м, які частково збігаються із зонами зчленування блоків, глибинними зонами розломів (ЗР) та їхніми перетинами. Мережа провідників на глибинах 0,1–2,5 км з  $\rho = 10-100$  Ом·м відображає систему ЗР, таких як Тальнівська, Первомайська, Врадіївська, Гвоздавська, Звенигородсько-Братська, Смілян-

ська, Субботсько-Мошоринська. Якщо до 2,5 км провідники представлені субвертикальними структурами, то глибше 3 км спостерігаються переважно субгоризонтальні шари [17]. На 3–10 км залягає диференційована по  $\rho = 10-250$  Ом·м аномалія, яка розташована на півночі Голованівського блока. Глибше 10 км розподіл аномально високого/низького  $\rho$  носить мозаїчний характер.

Так, аномалії високого  $\rho = 10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  добре узгоджуються з глибинними частинами масивів гранітоїдів: Уманського, Новоукраїнського та Корсунь-Новомиргородського. У земній корі аномалії низького  $\rho = 10\text{-}250 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  складної конфігурації приурочені до Лисянського блока, центральної частини Тальнівської й перетину Конкської та Первомайської ЗР. Розподіл  $\rho$  на глибинах 50–120 км відповідає "нормальному" для УЩ і розділяє неоднорідну верхню частину мантії [17]. За даними різних методів ГШЗ є перехідною областю за складом архейських комплексів земної кори [14], а також за типами мантії: на заході вона є диференційованою, на сході – деплетованою [15].

Таким чином, ГШЗ характеризується складним розподілом  $\rho$ , наявністю як приповерхневих, так і глибинних контрастних неоднорідностей електропровідності локального та регіонального масштабу, що приурочені до основних структурно-тектонічних одиниць регіону.

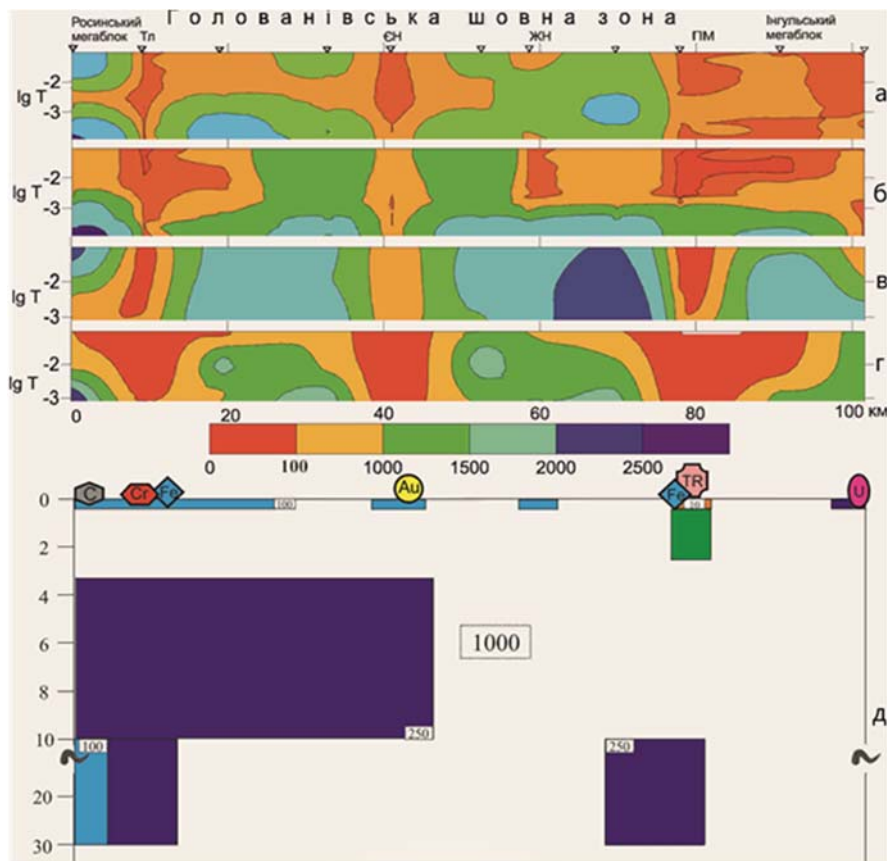
**Зв'язок аномалій електропровідності з родовищами і рудопроявами корисних копалин.** Часто родовища і рудопрояви рудних корисних копалин ГШЗ розташовані безпосередньо в об'ємі приповерхневих аномалій електропровідності. Крім того, їхнє розташування спряжене і з більш глибинними провідниками, до проєкції контурів яких вони потрапляють [8, 16]. Особливо яскраво це виявлено для Субботсько-Мошоринської ЗР, у межах якої локалізуються родовища і рудопрояви залізних руд, графіту, урану, хрому, золота (зокрема Майське родовище), нікелю, рідкісноземельних елементів. До цієї ЗР просторово приурочені аномалії електропровідності на різних глибинах, які продовжуються і на заході в межах ГШЗ та виявлені вздовж профілю "Первомайський" (рис. 2). Низькоомні зони були виявлені в межах цього профілю ще на етапі якісної інтерпретації [3] в межах ЗР, що перетинають профіль: Тальнівської, Журавлинського насуву, Ємилівської, Первомайської. При

побудові тривимірної моделі їхні просторові параметри та електропровідність були уточнені.

Псевдорозрізи  $\rho_n$  показують, що наведена в роботі [17] модель розподілу  $\rho$  задовольняє спостережені дані (рис. 2, а, б). Локальні електропровідні об'єкти, що закладені в модель у районі Тальнівської ЗР на глибинах до 100 м і 10–30 км (рис. 2, д), дали можливість досягти низьких значень  $\rho_n$  на всьому діапазоні Т (рис. 2, в, г). У цьому районі розташовані рудні поля: Хашчеватське, Заваллівське та Савранське, що містять родовища та рудопрояви залізних руд, нікелю, кобальту, графіту, золота (Майське) та ін. На глибинах 3–10 км на захід від Ємилівської ЗР розташована аномалія електропровідності, що охоплює всю цю область і відповідає Побузькому металогенічному району. До Первомайської ЗР приурочені провідники з поверхні до 2,5 км, а також на глибинах 10–30 км (рис. 2, д), у межах яких виявлені рудопрояви залізних руд і рідкісноземельних елементів.

За даними [8], перспективні концентрації урану і золота часто приурочені до лінійних аномалій електропровідності на глибинах 0,1–2,5 км в Інгульському мегаблці УЩ, що пов'язані із зонами метасоматично змінених порід. Слід виділити спряженість зон підвищеної електропровідності Кіровоградської, Первомайської, Бобринецької ЗР з родовищами і рудопроявами різних корисних копалин [8, 9]. Подібні аномалії виявлені й у ГШЗ і з ними так само спряжені родовища і рудопрояви золота, урану, графіту, літію в Первомайській ЗР, а також поблизу Тальнівської ЗР (Савранське рудне поле).

У роботі [5] авторами наведено металогенічне районування в межах Лисянського, Ятранського і Голованівського блоків південної частини ГШЗ, а також прилеглої території Дністровсько-Бузького та Інгульського мегаблоків. Виділені металогенічні таксони просторово збігаються з проєкціями аномалій високої електропровідності на денну поверхню.



**Рис. 2. Профіль "Первомайський". Псевдорозрізи позірного опору за спостереженими даними:**

а – північна компонента; б – східна компонента; в – північна компонента, г – східна компонента; д – розріз 3D моделі та родовища і рудопрояви рудних корисних копалин [10].

Зони розломів: Тл – Тальнівська, Єн – Ємилівського насуву, Жн – Журавлинського насуву, Пм – Первомайська

Так, зона аномально високої електропровідності на глибинах до 50–100 м у вигляді системи субширотних провідників з  $\rho = 10\text{--}250$  Ом м відповідає прогнозним рудним полям Шамраєвському, Голованівському і Троянському [5], яким характерні високі концентрації золота, титану, рідкоземельних елементів, урану та міді. Тут же розташовано і Грушківське рудне поле із залізородними, нікель-кобальтовими, марганцеворудними, урановими рудопроявами. Усі вони потрапляють у контур аномалії електропровідності на глибинах 3–10 км, диференційованої за  $\rho = 10\text{--}250$  Ом м,  $d = 50$  км,  $l = 80$  км, яка розташована в північній частині Голованівського блока (рис. 2) та обмежена частинами Тальнівської, Врадіївської, Первомайської та Ємилівської ЗР. Вона майже повністю збігається з відомим Побузьким металогенічним районом, який характеризується нікель-хром-кобальтовою, золоторудною, графітовою мінералізацією. Природа цієї аномалії високої електропровідності швидше за все пов'язана зі специфічним складом і графітизацією порід, а також їхньою підвищеною тріщинуватістю. У цьому районі докембрійські породи представлені переважно гнейсами, сланцями, гранулітами і різноманітними магматичними породами, з якими пов'язані родовища графіту. Найбільш провідна частина цієї аномалії належить до району максимального розвитку гіпербазитів (серпентинітів) Середнього Побужжя – Капітанівка – Липовеньки. Якщо з поверхні підвищена електропровідність швидше за все пов'язана з розвитком серпентинітів, то глибше її природу можна пояснити графітизацією і тріщинуватістю гірських порід. Центральна частина аномалії з  $\rho = 10$  Ом м збігається з Деренюхінським рудним вузлом, що включає в себе Молдовське, Капітанівське та Тернуватське рудні поля і відповідні родовища залізних руд: Молдовське, Секретарське, Лацівське, Новоселицьке та ін. Крім того, названі рудні поля розташовані в межах аномалій на глибинах 0,1–2,5 км з  $\rho = 50$  Ом м в районі Врадіївської ЗР.

Ананівська структурно-металогенічна підзона спряжена з аномалією електропровідності вздовж  $30^\circ$  сх.д. з  $\rho = 100\text{--}250$  Ом м. Ця підзона включає в себе відомі рудні поля: Хашеватське, Заваллівське, Савранське та прогнози: Ольховецьке і Полянецьке. Дрібніші металогенічні таксони відповідають провідникам від поверхні й до глибин 2,5 км з  $\rho = 10$  Ом м у районі Тальнівської й Гвоздавської ЗР. Найімовірніше природа цих аномалій пояснюється значним вмістом графіту аж до 20–30 %, як у межах Заваллівського родовища. Тут же виявлені рудопрояви золота, урану, залізних і марганцевих руд, рідкоземельні прояви. До Савранського рудного поля належить добре відоме Майське родовище золота.

Південніше, між  $48^\circ 00'$  та  $48^\circ 30'$  пн. ш. розташовані системи провідників у вигляді трьох паралельних, гальванічно не зв'язаних між собою, об'єктів субмеридіонального простягання шириною 10 км, довжиною 30–45 км та з  $\rho = 2\text{--}100$  Ом м на глибинах менше 50–100 м. Просторово в їхніх межах розташовані вже згадані Лацівське, Новоселицьке родовища залізних руд, Лозоватське і Калинівське родовища урану.

В інтервалі глибин від 100 м до 2,5 км у геоелектричній моделі підібрані в основному субмеридіональні провідники з  $\rho = 50$  Ом м, які з півночі на південь гальванічно зв'язані в один ланцюг. У районі Первомайської ЗР вони спряжені з рудопроявами золота, урану, літію, рідкісних земель.

**Природа аномалій електропровідності центральної частини УЩ.** Зони підвищеної електропровідності можуть бути представлені як твердими, так і рідкими фазами – флюїдами. Опір порід кори зі збільшенням температури зменшується набагато слабкіше, ніж при появи

твердої або рідкої фази провідників. Висока електропровідність у корі може бути пояснена включеннями графіту і сульфідів, які повинні володіти суцільною зв'язністю, але в геологічній історії давньої континентальної кори цілком можливі етапи активізації, і тоді низький опір в надрах щитів може бути пов'язаний з присутністю флюїдів різного походження.

Електропровідні структури на глибинах близько 2–10 км можуть утворюватися в результаті дилатанції – зміни об'єму породи при зсувній деформації [13]. Проте складно уявити реалізацію такого механізму електропровідності на великих глибинах у середній і нижній частинах кори, оскільки зі збільшенням тиску і зменшенням пористості в породах відсоток зв'язаних каналів зменшується.

Разом із тим, відомо, що кристалізація розплавів за певних умов призводить до утворення шаруватих інтрузивних тіл з підвищеною залізистістю верхніх шарів [2, 12]. Силікати з домішкою міді, бісмуту та інших перехідних металів мають високу здатність до провідності струмів за відносно низьких температур [1]. До підвищення електропровідності окремих шарів може призводити і насиченість їх вуглецем. Пластичність, слабка розчинність у магмі графіту дозволяють йому концентруватися у вигляді безперервних міжзернових плівок у товщах верхніх кристалічних порід на відносно великих площах.

У роботі [13] наведено результати вивчення опору порід, піднятих з надглибокої Криворізької свердловини. Для пояснення спостережених явищ запропоновано перколяційний механізм електропровідності двофазного середовища. Він може бути реалізований в процесі десерпентинізації порід [7] з вивільненням флюїду, який заповнив тріщинуватість, викликану надлишковим тиском. Флюїд сприяв збільшенню зв'язності провідників, зокрема графітових вкраплень, і загальна електропровідність зросла до рівня, при якому помітна Кіровоградська індукційна аномалія в геомагнітних варіаціях.

Такі уявлення поєднують гіпотези електропровідності – флюїдну і графітову.

Альтернативна точка зору викладена в монографії [6], де було запропоновано пояснення природи глибинних низькоомних аномалій (глибше 25 км) "затягуванням" на глибину гірських порід (залізисті кварцити, графітовмісні кристалічні породи) за глибинними ЗР у процесі субдукції. Ці високоелектропровідні породи (30–300 Ом м), метаморфізовані до гранулітової фази, збереглися на глибині під породами, що володіють високим електричним опором (1–5 кОм м).

**Висновки.** Вузли перетину систем розломів різного напрямку є головними рудолокалізуючими зонами в ГШЗ, в яких відбувалися активні геодинамічні процеси, а також магматична і постмагматична гідротермально-метасоматична діяльність. З останньою пов'язано утворення різноформаційних рудоносних метасоматитів, у тому числі із сульфідною і графітовою мінералізацією.

ГШЗ є перспективною на виявлення нових родовищ заліза, благородних і радіоактивних металів та їхніх супутніх елементів, графіту, рідкісних металів. Низькоомні аномалії приурочені до протяжних смуг і областей поширення графітовмісних порід і зон метасоматозу вздовж протяжних зон розломів у межах ГШЗ. В їхніх межах розташовуються більшість родовищ і рудопояв рудних корисних копалин, зокрема Савранське і Капітанівське рудні поля, Молдовське, Секретарське, Лацівське, Новоселицьке родовища залізних руд, Заваллівське родовище графіту, Південне, Лозоватське і Калинівське родовища урану, Майське родовище золота, а також рудопояви графіту, урану (Голованівське, Шамраївське, Кохановське), титану, золота, залізних руд, літію, міді, кобальту, хрому, нікелю (Демов'ярське) та ін. Проведення

детальних експериментальних робіт методами МТЗ і МВП із застосуванням новітньої апаратури та методики синхронного запису, обробка їхніх результатів за допомогою сучасних програмних комплексів дає можливість виконувати регіональне і локальне прогнозування рудопроявів і родовищ корисних копалин у межах УЩ.

#### Список використаних джерел

- Бахтерев В.В. Параметры электропроводности при высоких температурах дунитов в зависимости от степени серпентинизации / В.В. Бахтерев, Л.Д. Булыкин // Докл. РАН. – 2001. – Т. 379, № 6. – С. 793–796.
- Бондаренко М.А. Электрохимические исследования оксидных высокотемпературных сверхпроводников с различным типом проводимости / М.А. Бондаренко, Т.Н. Кольцова, В.В. Сергиевский // Докл. РАН. – 1992. – Т. 325, № 1. – С. 84–87.
- Бурахович Т.К. Глубинные геоэлектрические исследования Голованевской шовной зоны / Т.К. Бурахович, Б.И. Ширков // Геоинформатика. – 2015. – №1 (53). – С. 61–69.
- Возможности методов магнитотеллурики в задачах рудной геофизики / И.М. Варенцов, В.А. Куликов, А.Г. Яковлев, Д.В. Яковлев // Физика Земли. – 2013. – № 3. – С. 9–29.
- Геолого-геофизическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита / под ред. А.В. Андциферова, Е.М. Шеремета, Е.Б. Глевасского и др. – Донецк : Вебер, 2008. – 305 с.
- Геолого-геофизическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита / под ред. Н.Я. Азарова, А.В. Андциферова, Е.М. Шеремета и др. – К. : Наук. думка, 2006. – 197 с.
- Геофизическая модель тектоносферы Украины / В.Б. Бурьянов, В.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя, С.Н. Кулик, И.М. Логвинов – К. : Наук. думка, 1985. – 212 с.
- Ингульский мегаблок Украинского щита (глубинная геоэлектрическая модель и полезные ископаемые) / И.Ю. Николаев, Е.М. Шеремет, Т.К. Бурахович и др. – Донецк : Изд-во "Ноулидж" (Донецкое отделение), 2014. – 180 с.
- Использование результатов геоэлектрических исследований для прогнозирования месторождений полезных ископаемых на Украинском щите / Т.К. Бурахович, И.Ю. Николаев, Е.М. Шеремет, Б.И. Ширков // Геофиз. журн. – 2015. – Т. 37, № 6. – С. 42–63.
- Комплексна металогенічна карта України (масштаб 1 : 500000) та пояснювальна записка до неї. – К. : УкрДГРІ, 2003. – 336 с.
- Куликов В.А. Роль МТ-методов при поиске и разведке месторождений рудных полезных ископаемых / В.А. Куликов, И. М. Варенцов, А. Г. Яковлев // Матер. V Всерос. школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по ЭМ зондированиям Земли. – СПб., 2011. – Т. 2. – С. 286–289.
- Латынов Р.М. Физико-химические аспекты формирования магнетитовых габбро в расслоенном интрузиве Западно-Панских тундр, Кольский полуостров / Р.М. Латынов, С.Ю. Чистякова // Петрология. – 2001. – Т. 9, № 1. – С. 28–50.
- Лебедев Т.С. Исследование РТ-изменений электрических свойств горных пород нижней части разреза Криворожской сверхглубокой скважины (Украина) / Т.С. Лебедев, С.И. Шепель // Геофиз. журн. – 1997. – Т. 19, № 2. – С. 44–57.
- Пашкевич И.К. 3D магнитная модель Корсунь-Новомиргородского плутона и Новоукраинского массива и ее геологическая интерпретация / И.К. Пашкевич, М.И. Бакаржиева // Геофиз. журн. – 2013. – Т. 35, № 4. – С. 115–126.
- Цымбал С.Н. Состав верхней мантии под Украинским щитом / С.Н. Цымбал // Геология и магматизм докембрия Украинского щита: відп. ред. М.П. Щербак. – К., 2002. – С. 215–218.
- Шеремет Е.М. Критерии поисков руды в областях субдукции Украинского щита / Е.М. Шеремет, С.Г. Кривдик, Т.К. Бурахович. – <http://yadi.sk/d/VNlpoEsw2ANz8> Deutschland: "Saarbrücken", LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2013. – 418 с.

17. Ширков Б.И. Трёхмерная геоэлектрическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита / Б.И. Ширков, Т.К. Бурахович, А.Н. Кушнир // Геофиз. журн. – 2017. – Т. 39, № 1. – С. 41–58.

18. Электромагнитные методы при изучении Украинского щита и Днепроовско-Донецкой впадины / В.В. Белявский, Т.К. Бурахович, С.Н. Кулик, В.В. Сухой. – К. : Знання, 2001. – 227 с.

#### References

- Bahterev, V.V., Bulykin, L.D. (2001). Parametry jelektroprovodnosti pri vysokih temperaturah dunitov v zavisimosti ot stepeni serpentinizacii. *Dokl. RAN*, 6, 793–796. [In Russian].
- Bondarenko, M.A., Kol'cova, T.N., Sergievskij, V.V. (1992). Jelektrohimijskie issledovanija oksidnyh vysokotemperaturnyh sverhprovodnikov s razlichnym tipom provodimosti. *Dokl. RAN*, 1, 84–87. [In Russian].
- Burahovich, T.K., Shyrkov, B.I. (2015). Glubinnye geojelektricheskie issledovanija Golovanevskoj shovnoj zony. *Geoinformatika*, 1, 61–69. [In Russian].
- Varencov, I.M., Kulikov, V.A., Jakovlev, A.G., Jakovlev, D.V. (2013). Vozmozhnosti metodov magnitotelluriki v zadachah rudnoj geofiziki. *Fizika Zemli*, 3, 9–29. [In Russian].
- Anciferov, A.V., Sheremet, E.M., Glevasskij, E.B. (Ed.). (2008). *Geologo-geofizicheskaja model' Golovanevskoj shovnoj zony Ukrainskogo shhita*. Doneck: Veber, 305 p. [In Russian].
- Azarov, N.Ja., Anciferov, A.V., Sheremet, E.M. (Ed.). (2006). *Geologo-geofizicheskaja model' Krivorozhsko-Kremenchugskoj shovnoj zony Ukrainskogo shhita*. Kyiv: Naukova dumka, 197 p. [In Russian].
- Bur'janov, V.B., Gordienko, V.V., Zavgordnjaja, O.V., Kulik, S.N., Logvinov, I.M. (1985). *Geofizicheskaja model' tektonosfery Ukrainy*. Kyiv: Naukova dumka, 212 p. [In Russian].
- Nikolaev, I.Ju., Sheremet, E.M., Burahovich, T.K., Krivdik, S.G., Kalashnik, A.A., Nikolaev, Ju.I., Setaja, L.D., Agarkova, N.G. *Ingu'lskij megablock Ukrainskogo shhita (glubinnaja geojelektricheskaja model' i poleznye iskopaemye)*. (2013). Doneck: Noulidzh, 180 p. [In Russian].
- Burahovich, T.K., Nikolaev, I.Ju., Sheremet, E.M., Shyrkov, B.I. (2015). *Ispol'zovanie rezul'tatov geojelektricheskikh issledovanij dlja prognozirovanija mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh na Ukrainskom shhite*. *Geofizicheskij zhurnal*, 6, 42–63. [In Russian].
- Kompleksna metalohenična karta Ukrayiny (masshtab 1:500000) ta poyasnyuvalna zapyska do neyi. (2003). Kyiv, UkrDHRH, 336 p. [In Ukrainian].
- Kulikov, V.A., Varencov, I.M., Jakovlev, A.G. (2011). Rol' MT-metodov pri poiske i razvedce mestorozhdenijrudnyh poleznyh iskopaemyh. *Materialy V Vseros. shkoly-seminara im. M.N. Berdichevskogo i L.L. Van'jana po JeM zondirovanijam Zemli.Sankt-Peterburg*. SPbGU, 286–289. [In Russian].
- Latynov, R.M., Chistjakova, S.Ju. (2001). Fiziko-himicheskie aspekty formirovanija magnetitovyh gabbro v rassloennom intruzive Zapadno-Panskih Tundr, Kol'skij poluostrov. *Petrologija*, 1, 28–50. [In Russian].
- Lebedev, T.S., Shepel', S.I. (1997). Issledovanie RT-izmenenij jelektricheskikh svojstv gornyh porod nizhnej chasti razreza Krivorozhskoj sverhglubokoj skvazhiny. (Ukraina). *Geophysical Journal*, 2, 44–57. [In Russian].
- Pashkevich, I. K., Bakarzhieva, M. I. (2013). 3D magnitnaja model' Korsun'-Novomirgorodskogo plutona i Novoukrainskogo massiva i ee geologicheskaja interpretacija. *Geophysical Journal*, 4, 115–126. [In Russian].
- Cymbal, S.N. (2002). Sostav verhnjej mantii pod Ukrainskim shhitom. *Geologija i magmatizm dokembriju Ukrains'kogo shhita*. Kyiv, 215–218. [In Russian].
- Sheremet, E. M., Krivdik, S. G., Burahovich, T. K. (2013). Kriterii poiskov rudy v oblastjah subdukcii Ukrainskogo shhita. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 418 p. [In Russian].
- Shyrkov, B.I., Burahovich, T.K., Kushnir, A.N. (2017). Trjohmernaja geojelektricheskaja model' Golovanevskoj shovnoj zony Ukrainskogo shhita. *Geophysical Journal*, 1, 41–58. [In Russian].
- Bel'jaskij, V.V., Burahovich, T.K., Kulik, S.N., Suhoj, V.V. (2001). Jelektromagnitnye metody pri izuchenii Ukrainskogo shhita i Dneprovsko-Donec'koj vpadiny. Kyiv: Znannja, 227 p. [In Russian].

Надійшла до редколегії 21.06.17

B. Shyrkov, Cand. Sci. (Geol.), Geophysicist I cat.  
 bog\_dan90@ukr.net,  
 T. Burakhovych, Dr. Sci. (Geol.), Leading Researcher  
 burahovich@ukr.net  
 Subbotin Institute of Geophysics  
 National Academy of Sciences of Ukraine  
 32, Acad. Palladina Ave., Kiev, 03680, Ukraine

## ELECTROMAGNETIC METHODS FOR FORECASTING OF MINERAL RESOURCES OCCURENCES

The purpose of the article is to study the relationships of electrical conductivity with geodynamics, metallogenic and structural features of the geological environment. Methods: three-dimensional geoelectrical modelling using Mtd3fwd R.L. Mackie's program based on geophysical experiment as magnetotelluric sounding and magnetovariational profiling investigations. It revealed that the anomalies of high electrical conductivity with  $\rho = 2\text{--}250 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$  in the crust coincide with the deep fault zones: Talne, Pervomaisk, Vradievka, Gvozdevka, Zvenigorod-Bratsk, Smila, Subboto-Moshorinka; to the depths of 2,5 km they are subvertical structures and deeper – mainly subhorizontal layers. Outside the suture zone a heterogeneous upper mantle is observed. The low resistivity anomalies are confined to the elongated strips and areas of the spread of the graphitized rocks and metasomatic zones extended along the fault zones. On its boundaries there is a large amount of the ore deposits in the region. The nodes of the intersection of fault systems of the different directions are the main ore-localizing structures in the Golovanivsk suture zone, in which the active geodynamic processes occurred, as well as magmatic and postmagmatic hydrothermal-metasomatic activity. The last is associated with the formation of the ore-bearing metasomatites, including sulfide and graphite mineralization. The Golovanivsk suture zone is promising for the new

deposits of iron, noble and radioactive metals and their accompanying elements, graphite, rare metals. For the first time, the spatial relationship between the electrical conductivity anomalies and mineral occurrences is shown for the Golovanivsk suture zone. The distribution of electrical conductivity in the Earth's crust and upper mantle of the Golovanivsk suture zone can be used for the developing of deep geological and tectonic models and predictive metallogenic maps, as well as for an explanation of geodynamic processes in the region.

Keywords: the Golovanivsk suture zone, 3D geoelectric model, electromagnetic methods, deep structure, mineral occurrences.

Б. Ширков, канд. геол. наук, геофиз. I кат.

bog\_dan90@ukr.net,

Т. Буратович, д-р геол. наук, вед. науч. сотр.

burahovich@ukr.net

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины

пр. Акад. Палладина, 32, г. Киев, 03680, Украина

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РУДОПРОЯВЛЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Цель работы заключается в изучении связей электропроводности с геодинамикой, металлогеническими и структурными особенностями геологической среды. Методы: трёхмерное геоэлектрическое моделирование геологической среды с помощью программы *Mtd3fwd R.L. Maskie* на основе данных магнитотеллурического зондирования и магнитовариационного профилирования. Выявлены аномалии высокой электропроводности с  $\rho = 2-250$  Ом м в земной коре, которые совпадают с глубинными зонами разломов: Тальновской, Первомайской, Врдаиевской, Гвоздавской, Звенигородско-Братской, Смелянской, Субботско-Мошоринской; до глубин 2,5 км представлены субвертикальными структурами, а глубже в основном субгоризонтальными слоями. Вне Голованевской шовной зоны наблюдается неоднородная земная кора и верхняя мантия в виде региональных Черновицко-Коростенской и Кировоградской аномалий электропроводности. Низкоомные аномалии приурочены к протяжённым полосам и областям распространения графитизированных пород и зон метасоматоза вдоль протяжённых зон разломов. В их пределах находятся большинство известных в регионе месторождений и рудопроявлений рудных полезных ископаемых. Узлы пересечения систем разломов различного направления являются главными рудокализирующими в ГШЗ, в которых происходили активные геодинамические процессы, а также магматическая и постмагматическая гидротермально-метасоматическая деятельность. С последней связано образование рудоносных метасоматитов, в том числе с сульфидной и графитовой минерализацией. ГШЗ является перспективной на выявление новых месторождений железа, благородных и радиоактивных металлов и их сопутствующих элементов, графита, редких металлов. Впервые для ГШЗ показана пространственная связь аномалий электропроводности с месторождениями и рудопроявлениями полезных ископаемых. Полученное распределение электропроводности в земной коре и верхней мантии ГШЗ может использоваться при построении глубинных геологических и неотектонических моделей, прогнозных металлогенических карт и схем Украинского щита, а также для объяснения геодинамических процессов региона.

Ключевые слова: Голованевская шовная зона, 3D геоэлектрическая модель, электромагнитные методы, глубинное строение, рудопроявления.

## ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.078

С. Кекелия, д-р геол.-минерал. наук, глав. науч. сотр.

E-mail: sergokekelia@yahoo.com, тел: +995 592082390,

М. Кекелия, д-р геол.-минерал. наук, зав. отделом

E-mail: kekelia33@yahoo.com, тел: +995 599716984,

Н. Попхадзе, академ., д-р по геологии, науч. сотруд.

E-mail: nino\_popkhadze@yahoo.com, тел: +995 599 161694,

Н. Гагнидзе, академ., д-р по геологии, науч. сотр.

E-mail: nonagagnidze@gmail.com, тел: +995 595 515286

Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили  
Геологический институт, ул. Палитковской, 31, г. Тбилисси, 0186, Грузия

### ВУЛКАНОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ПАЛЕООСТРОВОДУЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ПРОБЛЕМЫ ГЕНЕЗИСА РУД (на примере рудных объектов Грузии, Армении и Турции)

*(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол.-мінерал. наук, проф. В.М. Загнітком)*

*Цель: изучение окорудного пространства вулканогенных месторождений цветных металлов палеостроводужных сооружений (на примере Маднеульского месторождения) и определение условий их формирования с использованием геохимических и термобарогеохимических исследований.*

*Методы: выполнено картирование карьера Маднеульского месторождения, определены содержания редких и рассеянных элементов на приборе ICP-MS, в Геологической службе США и Кавказском институте минерального сырья проведены термобарогеохимические исследования и определён изотопный состав кислорода и водорода в рудах.*

*Результаты: выявлены структурные особенности месторождения, характер окорудного пространства, определён минеральный состав метасоматитов и доказана многоэтапность формирования месторождений.*

*Научная новизна: высказаны соображения о генезисе вулканогенных месторождений альпийских палеостроводужных сооружений с учётом выполненных авторами термобарогеохимических исследований, а также с привлечением существующих в научном мире представлений о генезисе месторождений.*

*Практическая значимость: описанные особенности окорудного пространства могут быть с успехом использованы в других регионах в процессе поисков месторождений вулканогенного класса.*

*Ключевые слова: Кавказ, вулканогенные месторождения, структура, цветные металлы, метасоматические изменения.*

**Введение.** В центральной части Альпийско-Гималайского горного пояса сохранились фрагменты палеостровных дуг и прилегающих к ним структур – задуговых и внутридуговых морских палеобассейнов. Одной из таких палеодуг является Понтийско-Южнокавказская (на рис. 1 фрагменты палеодуги выделены серым цветом). Именно в её вулканоструктурах сосредоточены наиболее крупные по масштабам месторождения цветных металлов колчеданного семейства. В альпийскую эпоху максимум вулканической активности приходился на востоке палеоструктуры – на байос-позднюю юру, а на западе (в Турции и Грузии) – на мел. К числу важнейших тектонических событий, предопределивших геологический облик альпид этого сегмента горно-складчатого сооружения, относятся: 1) отторжение Иранской микроплиты от края Гондваны в перми-триасе и ее присоединение к активной Евразийской окраине Восточно-Тихоокеанского типа; 2) раскрытие в конце триаса – начале юры рифта, преобразованного в одну из ветвей океана Неотетис; 3) обдукция в сеноне океанических комплексов – по образному выражению А. Книппера, обозначающая "смерть" океана [19]. Здесь взаимодействовали в течение альпийского цикла Скифская и Южнокавказско-Понтийская (активная палеоокраина Евразийского континента) с Гондванскими блоками (Киршехирским, Анатолийским, Таврским, Даралагезским и другими). В настоящее время эти подвижные блоки земной коры (террейны) разделены шовными зонами (сутурами), большая часть которых маркируется ультрабазитовым меланжем. Здесь, на активной окраине Евразийского континента возникали термоаномалии, размещение которых было избирательным и совпадало с областями, испытывавшими наибольшие напряжения – зонами влияния трансформных разломов. Именно в этих местах, в условиях конвергентного взаимодействия микроплит, проявлялась вулканическая активность, а также гидротермальная деятельность.

**Результаты.** На турецкой территории промышленными месторождениями колчеданного семейства являются Ашикей, Лаханос, Кутлулар, Чаели, Мургул, Черратепе. Здесь же размещено медно-молибденпорфировое месторождение Гузеляйла. Следует подчеркнуть, что Восточные Понтиды являются тем единственным регионом Понтийско-Южнокавказской островной палеодуги, где выявлены гидротермально-осадочные скопления руд цветных металлов. Их примерами служат месторождения Ашикей и Чаели (Маденкой). На месторождении Чаели руды (запасы меди более 800 тыс. т) сосредоточены в одной залежи, которая прослежена по простиранию на 920 м, ее максимальная мощность 100 м [28]. Здесь вулканоструктура слагается надрудными базальтами (пиллоу-лавами), чередующимися с известняками и "пурпурными" туфами, а также пропилитизированными дацитами. На последних и залегают массивные сульфидные руды, под которыми проявлены кварц-хлорит (с серицитом), метасоматиты с прожилками и вкрапленностью сульфидов. Внутри тела выделены, как и на месторождениях типа Куроко, желтые (обогащенные халькопиритом) и чёрные (обогащенные сфалеритом) руды. Рудная залежь, которая сохранилась в позднемиоценовых вулканитах, подвергалась неоднократному брекчированию под воздействием взрывных явлений в процессе функционирования гидросистемы. Массивные руды залегают на гиалокластитах, состоящих в основном из ориентированных "обломков" фельзитов. Гиалокластиты интенсивно изменены: пиритизированы и каолинитизированы. Под гиалокластитами размещены фельзиты с редкими порфировыми выделениями кварца и полевого шпата. На отмеченные породы наложен кварц-пирит-халькопиритовый штокверк. Отмечается [27], что для кластических руд Чаели характерна хорошо выраженная слоистость; руды состоят в основном из угловатых и полуокатанных обломков сульфидов (сфалерита, пирита и халькопирита).

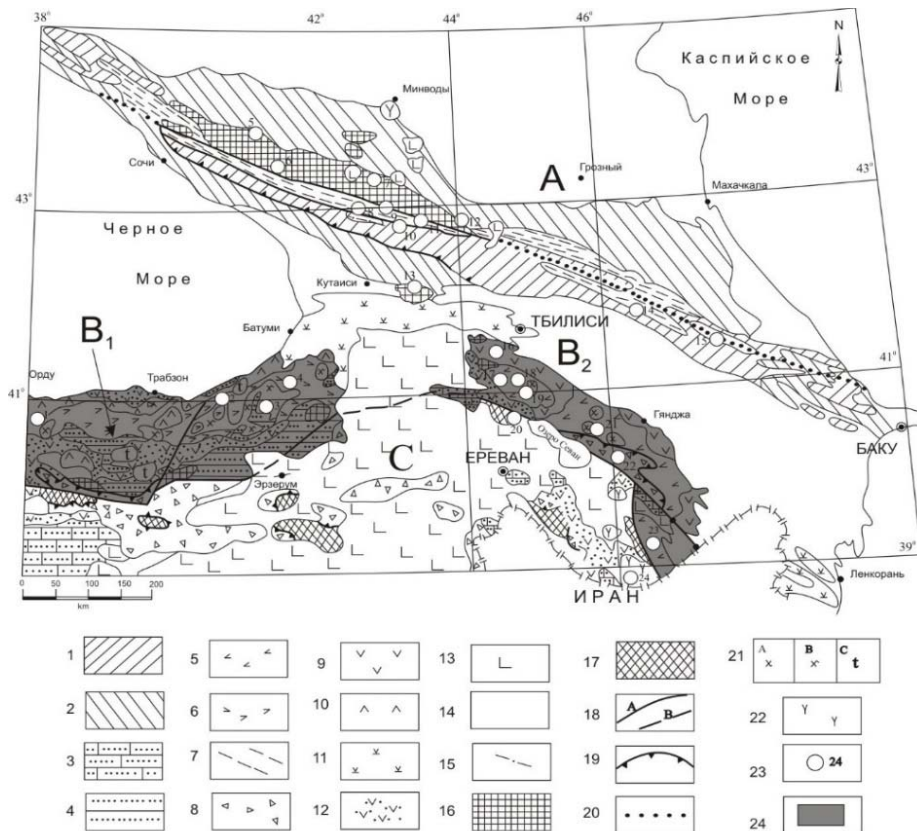


Рис. 1. Распределение основных рудных месторождений в пределах Восточной Турции и Кавказа:

- 1 – склон и поднятие Южнокавказского микроконтинента (юра – ранний мел, Большой Кавказ); 2 – шельфовая зона Скифского и Южно-Кавказского микроконтинентов (юра – палеоген, Большой Кавказ); 3 – шельфовая зона Анатолийского и Даралагезского микроконтинентов (мел – палеоген); 4 – шельфовая зона Понтийского микроконтинента (ранняя юра, Восточные Понтиды); 5 – малокавказская энциалическая островная дуга (байос – ранний мел); 6 – Понтийская энциалическая островная дуга (мел); 7 – глубоководные бассейны краевого палеоморя (ранняя – средняя юра); 8 – океанические зоны в аллохтонном залегании; 9 – Малокавказская задуговая вулканодепрессия (поздний мел); 10 – Понтийская задуговая вулканодепрессия (поздний мел); 11 – внутриплитные рифтогенные вулканоструктуры (эоцен – олигоцен, Малый Кавказ); 12 – эоценовые вулканодепрессии, наложенные на доколлизийные структуры (Понтиды, Малый Кавказ, Анатолиды); 13 – молодые вулканические плато (олигоцен – четвертичный); 14 – орогенные трюги (олигоцен – четвертичный); 15 – терригенно-вулканические породы (дизская серия, девон – триас), интродуцированные среднеюрскими гранитоидами; 16 – доальпийский фундамент Скифской и Южнокавказской микроплит (докембрий? – палеозой); 17 – доальпийский фундамент Анатолид и Даралагеца (Североиракская микроплита, докембрий – палеозой); 18 – тектонические швы, разделяющие основные геоблоки (взбросы и сдвиги, А – установленные, В – предполагаемые); 19 – надвиги; 20 – предполагаемая граница между Скифской и Южнокавказской микроплитами (перекрывается надвигами); 21 – гранитоиды (а – ранний мел, в – поздний мел, с – эоцен – олигоцен); 22 – монзониты, сиениты (олигоцен – миоцен); 23 – месторождения полезных ископаемых; 24 – фрагменты палеостроной дуги.
- Наиболее значительные рудные месторождения Восточных Понтид и Кавказа:** 1 – Ашикой (Cu); 2 – Лаханос (Cu, Zn, Pb); 3 – Чаели-Маденкой (Cu, Zn); 4 – Мургул (Cu, Zn), 5 – Уруп (Cu); 6 – Кти-Теберда (W); 7 – Тырны-Ауз (W); 8 – Лухра (Au); 9 – Цана (As, Au); 10 – Лухуми (As); 11 – Зопхито (Au, Sb); 12 – Садон (Pb, Zn); 13 – Чиатура (Mn); 14 – Филизчай (Zn, Pb, Cu); 15 – Кизил-Дере (Cu); 16 – Маднеули (Cu, Au, Zn, Pb); 17 – Алаверди (Cu); 18 – Шамлуг (Cu); 19 – Техут (Cu); 20 – Меградзор (Au); 21 – Дашкесан (Fe, Co); 22 – Зод (Au); 23 – Кафан (Cu); 24 – Каджаран (Cu, Mo).
- Микроплиты:** Евразийского палеоконтинента: А – Скифская, В – Понтийско-Южнокавказская (В<sub>1</sub> – Восточные Понтиды, В<sub>2</sub> – Южный Кавказ); Афро-Аравийского палеоконтинента: С – Северо-Иранская

Другой тип гидротермально-осадочной минерализации (Ашикей) был обнаружен в аллохтоне, по-видимому, перемещенном в палеостроющую структуру из окраинного морского бассейна Палеотетиса. По данным [41], в местах проявления рудной минерализации наблюдается геологическая картина, сходная с Кипрской. Следует согласиться с М. Гюнером [31], который отнес "облагороженные" медью серноколчеданные залежи к кипрскому типу VMS. Было выяснено, что в районе Кюре, на месторождении Ашикей-Тайконду [29], базальты офиолитового комплекса по химическим характеристикам относятся к образованиям зон спрединга. Допускается, что в триасе – ранней юре спрединговая зона располагалась в задуговом бассейне.

Примерами прожилково-вкрапленных руд в Понтидах являются месторождения Мургул, Кутлупар, Черратаре и Лаханос. На Лаханосе штокверк сфалерит-пирит-халькопиритового состава проявлен в дацитовом штоке. Прожилково-вкрапленная минерализация сосредоточена в ареале

развития кварц-серицит-хлоритовых метасоматитов. Сходную с Лаханосом геологическую позицию занимает месторождение Мургул. Здесь штокверк пирит-халькопиритовых руд ограничен сверху кварцево-железистыми (яшмовидными) образованиями, на уровне которых были размещены гипсовые линзы. Рудовмещающие лавы дацитов эродированы и несогласно перекрыты кампан-маастрихтскими вулканидами. Вблизи Мургула, на участке Кизилкая [37], были известны гидротермально-осадочные залежи с "черными" и "желтыми" рудами, для которых характерны колломоρφные полосчатые и фрамбоидальные текстуры.

Медно-свинцово-цинковая прожилково-вкрапленная минерализация – отличительная черта грузинских и армянских месторождений (запасы меди в каждом из них не превышали 400–450 тыс. т). Уникальным в рудно-геологическом смысле является грузинское месторождение Маднеули, в пределах которого пространственно сближены разноэтапные золотые, барит-сульфидные и мед-

ные руды (рис. 2). Меловая вулканотектоническая депрессия представляла собой часть задугового бассейна. Вулканоструктура складывается тремя комплексами, которые являются результатом функционирования в течение альба-кампана в начале вулканов трещинного типа, а затем и центральных [14]. Верхний комплекс – контрастный базальт-андезит-риодацитовый – завершает вулканическую деятельность. Рудоносными являются куполовидные "вздутия", образованные в местах выжимания риодацитовых экструзий среднего риодацитового комплекса (в состав которого входят игнимбриты, экструзии и лавы риолитов и риодацитов на склонах крупных вулканических построек). Последние слагаются андезиитоидами нижнего вулканогенно-осадочного комплекса.

Рудоносные блоки ограничены разломами СЗ и СВ простираний, которые и являются магмо- и рудовыводящими. Под покровами лав риодацитов в результате гидротермальной "коллагса" были сформированы эксплозивные брекчии, преобразованные во вторичные кварциты, кварц-гидрослюдистые с хлоритом метасоматиты и пропилиты. Нашими полевыми исследованиями было подтверждено, что Маднеульская вулканокупольная постройка размещена на склоне Далидагского палеовулкана, сложенного, помимо пирокластолитов андезиито-дацитов, также покровами игнимбритов и лав риодацитов.

Важными и обязательными элементами рудоносной вулканоструктуры являются поздние гипабиссальные тела гранодиорит-порфиров, являющиеся, по-видимому, коматитами кампанского андезито-базальтового комплекса. На рис. 2 (одном из горизонтальных срезов месторождения) показано взаимоотношение руд и окорудных метасоматитов. Под игнимбритами и лавами куполов установлена следующая метасоматическая колонна: на верхних горизонтах и центральных частях – монокварциты, которые на глубине и флангах сменяются кварц-серицит-хлоритовыми метасоматитами, а последние – пропилилизированными и огипсованными (часто с андалузитом) туффитами. На месторождении отчетливо выделяются два рудных уровня: верхний баритополиметаллический с золотом в кварцитах и нижний – в основном сложенный медными (с пиритом) прожилково-вкрапленными рудами.

Следует подчеркнуть, что баритовые, баритополиметаллические и медные руды разобщены в пространстве и, вероятно, являются разновозрастными. Золотое оруденение во "вторичных кварцитах" является наиболее ранним. Остается впечатление, что интенсивные преобразования пород с образованием метасоматической колонны внутри купольной маднеульской структуры предшествовали основному рудному процессу. Рудоносный блок ограничен разломами СЗ и СВ простираний, которые являлись магмо- и рудовыводящими. По нашим данным [36], базальты района ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0/0704910$ ) могли быть продуктами дифференциации неистощенной мантии, а риолиты маднеульского месторождения – продуктами верхней коры ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,710269$ ). О коровом источнике риолитов и игнимбритов свидетельствует и установленные в них европиевые отношения (для риолитов =  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0/65-0/68$ ; игнимбритов –  $0,52-0,58$ ), а также обогащение пород легкими РЗЭ и крупноионными литофильными элементами – К, Rb, Ba, Sr [8].

По данным Т.Ш. Гогишвили [14], метасоматическими изменениями была охвачена практически вся Болнисская вулканодепрессия (рис. 3). В палеодепрессии уверенно картируются метасоматические формации кислотного выщелачивания. Так, на представленной схеме в зоне кислотного выщелачивания выделяются вторичные кварциты (опал-алунитовые, кварц-гидрослюдистые, реже андалузит, кварц-серицитовые и кварц-серицит-хлоритовые); в зоне щелочного метасоматоза – кварц-адуляр-серицитовые; в зоне кремнещелочного метасоматоза (пропилитах) – альбит-хлорит-пиритовые; альбит-хлорит-эпидот-гематитовые и альбит-хлорит-ангидритовые; в фельшпатоидах – кварц-калишпат-альбитовые, кварц-альбит-калишпат-хлоритовые, альбит-хлорит-адуляр-цеолитовые.

Распределения типоморфных слоистых силикатов, как и данные определения температур методом гомогенизации [2], свидетельствуют о наиболее высокотемпературных условиях минералообразования на уровне развития медных руд, где распространены слабо гидратированные слюды с высокотемпературной 2М политипной модификацией. На уровне развития барит-полиметаллических руд установлены гидротермальные слюды с низкотемпературной модификацией 1М.

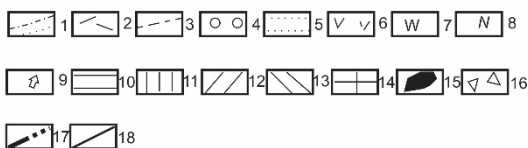
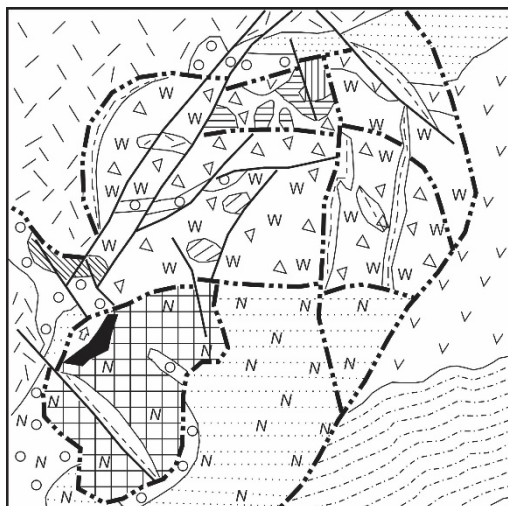


Рис. 2. Геолого-структурная карта карьера месторождения Маднеули:

- 1 – экструзия риодацитов; 2 – лавы риолитов;
- 3 – субвулканические риолиты; 4 – витрокластические туфы;
- 5 – псаммо-псефитовые туффиты; 6 – агломеративные и псаммо-псефитовые ксенотуфы; 7 – вторичные кварциты;
- 8 – кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты; 9 – скопления гипса-ангидрита; руды: 10 – баритовые, 11 – массивные барит-свинцово-цинковые; 12 – прожилковые полиметаллические (с малой примесью барита или без него); 13 – прожилковые медно-цинковые; 14 – прожилково-вкрапленные медные; 15 – сплошные мелкозернистые колчеданные; 16 – эксплозивная брекчия; 17 – пологие разрывы; 18 – близвертикальные разрывы

Нам представляется уместным привести геохимические данные по породам, вмещающим месторождение Рапу-Рапу (Филиппины), опубликованные в научной литературе [38]. Массивные сульфидные залежи месторождения Рапу-Рапу пространственно ассоциируют с дацитами, испытавшими зеленокаменное перерождение. Это месторождение относится к типу Куроко. В разрезе

ратуре [38]. Массивные сульфидные залежи месторождения Рапу-Рапу пространственно ассоциируют с дацитами, испытавшими зеленокаменное перерождение. Это месторождение относится к типу Куроко. В разрезе

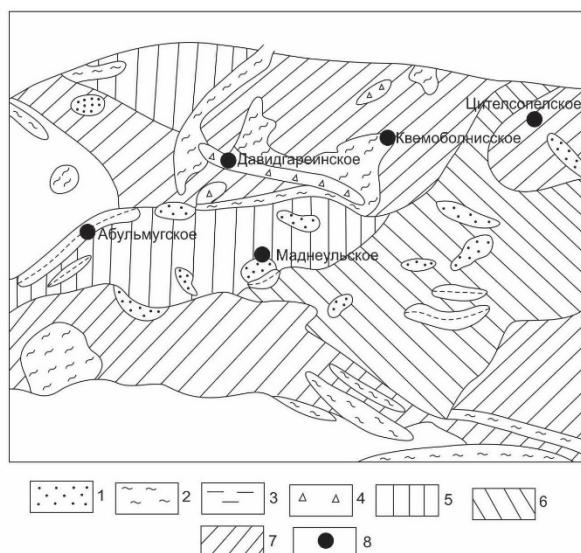


юрской рудовмещающей толщи, помимо рудовмещающих дацитов, установлены мафические и кварц-полевошпатовые осадочные породы. Дациты близки по своим химическим характеристикам к дацитам задугового бассейна Сумису; основные породы характеризуются низкими содержаниями  $TiO_2$  ( $\leq 0,9\%$ ) и Zr (40–50 ppm), низким отношением Zr/Y (2,5–3) и небольшим содержанием РЗЭ. Основные породы являются типичными представителями толеитов островных дуг и сопоставимы с миоценовыми андезито-базальтами месторождения Куроко и олигоценными базальтами дуги Фиджи. Исследователи полагают, что обогащенные РЗЭ вулканические породы месторождения Рапу-Рапу сформировались на стадии активного рифтогенеза океанической дуги или задугового юрского бассейна [38]. Любопытно, что на тех же Филиппинах известное месторождение Канатуан, которое сформировалось в обстановке незрелой дуги, что подтверждается резким уменьшением содержания легких РЗЭ в кислых и основных породах. Наши данные [36] свидетельст-

вуют о том, что отношения Zr/Y более высокие (для дацитов 9,5–11,2; для риолитов 2,7; для базальтов 3,7–4,1) и, вероятно, мы имеем дело с более зрелой палеодугой.

В среднеюрских вулканиках Армении были размещены медные и барит-полиметаллические ныне отработанные месторождения – Алавердское, Шамлугское, Ахтальское, Кафанское. В Алавердском районе в разрезе среднеюрской толщи маломощные хемогенно-осадочные отложения сменяются сверху вниз гиакокlastитами, скоплениями подводного коллювия, тефроидными турбидитами, лавами дацитов, андезитов и андезито-базальтов; рудовмещающая толща перекрыта позднеюрским вулканогенным комплексом [14].

Различия в характере руд отдельных сегментов палеостровной дуги проявляют прямую зависимость от геодинамических режимов функционирования вулканов. Отметим также, что на Малом Кавказе поиски гидротермально-осадочных залежей руд цветных металлов (подобных рудам месторождения Чаели, Турция) обречены на явную неудачу, поскольку здесь отсутствуют "геодинамические основания" для их накопления.



**Рис. 3. Схема размещения метасоматических формаций в Болисском районе (по Т.Ш. Гогишвили).**

**Зоны кислотного выщелачивания:** 1 – вторичные кварциты (опал-алунитовые, кварц-гидрослюдистые, реже андалузит-диаспоровые); 2 – аргиллизиты (гидрослюда-монтморилонитовые, каолинит-алунитовые, хлорит-монтморилонитовые); 3 – кварц-серицитовые и кварц-серицит-пиритовые.

**Зоны щелочного метасоматоза:**

4 – кварц-адуляр-серицитовые и гиrolюдитистые.

**Зоны кремнещелочного метасоматоза (пропилиты):**

5 – альбит-хлорит-серицит-пиритовые;

6 – альбит-хлорит-серицит-пиритовые и альбит-хлорит-ангидритовые; фельшпатофиры; 7 – кварц-калишпат-альбитовые; кварц-альбит-калишпат-хлоритовые, альбит-хлорит-адуляр-цеолитовые, 8 – месторождения

**Заключение.** В заключении обратим внимание на возможные условия формирования руд.

Представления о магматическом источнике флюидов вулканогенных месторождений в последние годы потеряли свою привлекательность из-за трудностей, связанных с необходимостью объяснения вовлечения в гидротермальный процесс значительных объемов воды. Сам механизм отделения флюидов из магматических камер мыслится как относительно кратковременное явление. "Следы" последнего в магматических (интрузивных) телах выражены автометасоматическими изменениями, равномерным распределением субмикроскопических индивидов окислов в межзерновом пространстве породообразующих минералов. Изотопно-геохимические исследования склоняют исследователей к мысли о большой доле метеорных вод в гидросистемах вулканогенных месторождений [23, 25]. Экспериментальные работы [7, 34] по экстракции элементов из пород при РТ-условиях, соответствующих функционированию флюидов, допускают возможность рассмотрения магматических и осадочных образований в качестве источника металлов для вулканогенных месторождений.

На Малом Кавказе выполнен большой объем изотопно-геохимических и термобарогеохимических исследований, на основании которых, а также литературных дан-

ных по другим регионам, мы можем утверждать, что вулканогенные (колчеданного типа) месторождения отличаются следующие особенности:

1. Компонентный состав руд проявляет зависимость от петрохимических особенностей пород. Так, например, с андезито-базальтами и натриевыми риолитами ассоциирует медно-цинковая минерализация [17]. Было замечено, что рудоносные породы Срединно-океанических хребтов [21] включают сферические агрегаты окисно-рудных скоплений. В субщелочных эффузивах рифтовой долины Срединно-океанического хребта также обнаружены сульфиды в виде "капель" во вкраплениях клинопироксена и полевого шпата [1]. Отсюда можно предположить, что некоторые из магматитов были изначально продуктивными.

2. В пределах рудных узлов пути миграции гидротерм обозначены изменениями минерального состава пород. В нисходящих ветвях проявлены аргиллизиты, а надинтрузивные и фланговые зоны масштабно пропилитизированы.

3. Барит-сульфидные руды во вторичных кварцитах проявляют (напр., на Маднеули) неярко выраженную вертикальную зональность. Штокверки медных и медно-цинковых руд часто перекрыты гипсоангидритовыми линзами, а перекрывающие их породы гематитизированы. Эта кар-

тина характерна и для гидротермально-осадочных залежей типа Куроко. Об этом писали еще в конце 60-х гг. прошлого столетия Т. Мацукама и Е. Хорикоси [18].

4. По солености гидротермальные растворы близки к морской воде, но обогащены по сравнению с последней Fe, Ag, Pb, Cu и Zn [35]. Невысокая соленость – характерная особенность флюидов для зон современного рудообразования [3]. Этому не противоречат данные и по Малокавказским месторождениям [13, 14]. На Малокавказских месторождениях максимальная температура минералообразования установлена методом гомогенизации и равна 410–390 °С для медных, а для барит-полиметаллических – 280 °С [26]; давления соответствовали 150–200 барам (были использованы диаграммы, опубликованные в работе [39]). По данным Д. Аревадзе и В. Ярошевича [2, 26], выполнившим криометрические исследования газово-жидких включений в прозрачных минералах руд, на Маднеули соленость флюидов, отлагавших медные и барит-цинково-свинцовые руды, была низкой – менее 40 гр-экв NaCl на литр раствора. Растворы характеризовались хлоридно-сульфатным, калий-натриевым составом. Эти данные подтверждены и результатами химических анализов водных вытяжек из кварца, сульфидов и барита.

5. Как известно из научной литературы [4, 40], наиболее благоприятные условия для стабильного накопления руд гидротермально-осадочных залежей создавались на дне морских бассейнов, глубины которых колебались в пределах 2–3 км.

6. Данные по изотопному составу водорода и кислорода флюидных включений в кварце, барите и кальците вулканогенных барит-полиметаллических руд интерпретируются в пользу высокой доли участия метеорных вод в рудообразовательном процессе. В то же время метеорная вода для некоторых медных месторождений могла уступать магматогенной [17, 25, 26].

По материалам, собранным в Мировом океане [6, 10–12, 22], можно заключить, что масштабный рудогеонос осуществляется в случае протекания последовательных процессов: 1) кристаллизации магм; 2) взаимодействия приобретших "агрессивность" нагретых поверхностных вод с магматитами (причем тепловым источником являются внедрившиеся в вулканогенно-осадочные комплексы интрузии); 3) стабильного функционирования физико-химического барьера в области разгрузки гидротерм (впадины морского дна или закрытые структуры приповерхностных зон земной коры).

Развитие и функционирование гидросистем в вулканических комплексах можно представить следующим образом: в начале в задуговых и интрадуговых палеобассейнах – в локальных депрессиях отлагались вулканогенно-осадочные образования (причем, как правило, вулканогенные породы были известково-щелочными); вслед за спадом вулканической деятельности (в период инверсии вулканооструктур) внедрялись интрузии, кристаллизация которых происходила на глубинах около 2 км от поверхности или 1 км от морского дна. Гидротермально-осадочные залежи сходны по минеральному составу и структуре с современными потухшими "черными курильщиками". В них минеральная зональность объяснима перераспределением рудообразующих компонентов в результате разрушения "рудных холмов" и их диффузии с нижних на верхние уровни [9, 32].

На Кармадэгской островной дуге в вулканитах известны гидротермально-осадочные залежи типа Куроко [30]. По данным термогеохимических исследований соленость гидротермального раствора варьировала от 2,2 до 3,9 вес. % NaCl-экв. Температура гомогенизации колебалась от 175 до 322 °С. Мы привели этот пример, чтобы подчеркнуть стандартность физико-химических

условий формирования руд цветных металлов независимо от способа их отложения – эпигенетического или гидротермально-осадочного.

В условиях морского дна дестабилизация флюида происходит в связи с падением температуры и его окислением. Здесь допускается, с учетом состава взвесей, выбрасываемых "черными курильщиками" (пирит, пирротин, сфалерит), что металлы транспортировались в форме гидросульфидных комплексов. Уровни минералообразования эпигенетических месторождений в общих чертах сравнимы с зонами труб "черных курильщиков", граничные аномальные физико-химические параметры которых обусловили одновременную кристаллизацию ангидрита и сульфидов железа. Этим условиям отвечают зоны гидросистем с минимальными активностями кислорода, совпадающими с нижней границей устойчивости барита при равных активностях  $H_2S-SO_4^{2-}$  [24, 25, 36].

Зональность в эпигенетических барит-сульфидных залежах вулканогенных месторождений объясняется комплексом причин: 1) большей зависимостью растворимости медных минералов от температуры по сравнению с растворимостью сфалерита и галенита или различной устойчивостью комплексных соединений [20, 25]; 2) зависимостью осаждения металла от концентрации  $S^{-2}$ : так, при равных концентрациях металлов в растворе для выпадения меди и цинка требуется более высокая концентрация  $H_2S$ , чем для свинца [5]. Следует учитывать и действие сероводородного барьера, эффективность которого определяется малыми концентрациями  $S^{-2}$  [15].

Несколько слов и об образовании золотоносных кварцевых прожилков на Маднеули. Как нам представляется, они были образованы одновременно с формированием взрывчатых брекчий (начальный период гидротермального коллапса). Выпадение золота, кварца и малых количеств сульфидов во вторичных кварцитах на Маднеули, видимо, происходило в период дестабилизации флюида магматогенной природы. Ч. Хеинрич [33], который изучал Cu-Au порфириновые месторождения, отметил, что в условиях высоких температур магматические воды с невысокой соленостью способны транспортировать золото. А также то, что одним из главных условий транспортировки золота является достаточное количество  $H_2S$ . Магматические флюиды в условиях высоких давлений "сжижаются" в жидкость без гетерогенного фазового перехода, и их влияние на окружающую среду выражается калиевыми и пропиловыми изменениями.

#### Список использованных источников

- Акимцев В.А. "Рудные" эффузивы борта рифтовой долины Средне-Атлантического хребта / В.А. Акимцев, В.Н. Шарапов // Докл. РАН. – 1993. – 331, № 3. – С. 329–331.
- Аревадзе В.А. Физико-химические условия формирования эндогенных месторождений Закавказья : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук / В.А. Аревадзе. – Тбилиси : Мецниереба, 1989. – 54 с.
- Бортников Н.С. Современное сульфидное полиметаллическое минералообразование в мировом океане / Н.С. Бортников, И.В. Викентьев // Геология рудных месторождений. – 2005. – Т. 47, № 1. – С. 16–50.
- Габлина И.Ф. Ассоциации сульфидов меди в современных океанских рудах гидротермального поля Логачёв (Средне-Атлантический хребет, 140451) / И.Ф. Габлина, Н.Н. Мозговая, Ю.С. Бородаев, Т.В. Степанова, Г.А. Черкашев, М.И. Ильин // Геология рудных месторождений. – 2000. – Т. 42, № 4. – С. 329–349.
- Ганеев И.Г. Перенос вещества гидротермальными растворами / И.Г. Ганеев // Зап. Всесоюз. Минерал. об-ва. – 1989. – Вып. 1. – С. 3–16.
- Гринберг Г.А. Гидротермальное сульфидное оруденение в океане / Г.А. Гринберг, С.Г. Краснов, А.И. Айнемер, И.М. Порошина, Т.В. Степанова // Сов. геология. – 1990. – № 12. – С. 81–91.
- Гричук Д.В. Термодинамическая модель гидротермальной системы в океанической коре: оценки эволюции раствора / Д.В. Гричук, М.В. Борисов, Г.Л. Мельникова // Геология рудных месторождений. – 1984. – № 4. – С. 3–24.
- Гугушвили В.И. Коровые и мантийные источники мелового вулканизма и сульфидного рудообразования в Болнисском рудном районе / В.И. Гугушвили, М.А. Кекелия, Ч. Мун, М.П. Нацвлишвили // Тр. ГИН АН Грузии. – 2002. – Вып. 117. – С. 412–419.

9. Ельянова Е.А. Формирование состава и строения руд при современном и древнем колчеданообразовании / Е.А. Ельянова // Сов. геология. – 1989. – № 12. – С. 17–26.
10. Ельянова Е.А. Формирование современных и древних субмаринных колчеданных хруд: состав и строение / Е.А. Ельянова // Модели вулкано-осадочных рудообразующих систем: тез. докл. междунар. конф.; под ред. В.Е. Попова. – СПб., 1999. – С. 26–27.
11. Ельянова Е.А. Океанский рудогенез / Е.А. Ельянова, Е.Г. Мирлин // Сов. геология. – 1990. – № 6. – С. 47–55.
12. Зоненшайн А.П. Новая глобальная тектоника (тектоника плит) / А.П. Зоненшайн, А.А. Ковалёв (ред.). – М.: Мир, 1974. – 471 с.
13. Кекелия С.А. Геолого-генетические модели альпийских вулкано-генных месторождений цветных металлов Средиземноморского металлогенического пояса / С.А. Кекелия, В.З. Ярошевич, И.П. Ратман // Геология и геофизика. – 1991. – № 8. – С. 71–79.
14. Кекелия С.А. Вулканогенные месторождения цветных металлов палеоостроводужных сооружений и методика их прогнозирования / С.А. Кекелия, А.Н. Амбокадзе, И.П. Ратман. – Тбилиси: Мецниереба, 1993. – 96 с.
15. Крайнов С.П. Геохимические условия осаждения цинка и свинца из рассолов седиментационных бассейнов на сульфидном барьере / С.П. Крайнов, Л.И. Матвеев, Г.А. Соломин // Геохимия. – 1988. – С. 1708–1719.
16. Кривцов А.И. Прикладная металлогения / А.И. Кривцов. – М.: Недра. – 1989. – 288 с.
17. Меднорудные месторождения – типы и условия образования / под ред. А.И. Кривцова, Ю.В. Богданова, М.Б. Бородаевской, А.Д. Генкина, Н.К. Курбанова, А.П. Лихачева, И.Ф. Мигачева. – М.: Недра, 1987. – 197 с.
18. Мацукама Т. Обзор месторождений Куроко в Японии / Т. Мацукама, Е. Хорикоси; под ред. Т. Тацуми // Вулканизм и рудообразование. – М.: Мир, 1973. – С. 129–151.
19. Монин А.С. История океана Тетис / под ред. А.С. Монина, Л.П. Зоненшайна. – М.: Ин-т океанологии, 1987. – 155 с.
20. Овчинников Л.Н. Образование рудных месторождений / Л.Н. Овчинников. – М.: Недра, 1988. – 255 с.
21. Прокопцев Г.Н. Образование металлоносных гидротерм на дне океана / Г.Н. Прокопцев, Н.Г. Прокопцев // Изв. Акад. наук СССР. Сер. геологическая. – 1990. – № 4. – С. 34–44.
22. Рона П. Гидротермальная минерализация областей спрединга в океане / П. Рона. – М.: Мир, 1986. – 160 с.
23. Синяков В.И. Общие рудогенетические модели эндогенных рудных формаций / В.И. Синяков. – Новосибирск: Наука, 1986. – 243 с.
24. Твалчрелидзе А.Г. Геохимические условия формирования месторождений массивных сульфидных руд / А.Г. Твалчрелидзе. – М.: Недра, 1987. – 188 с.
25. Франклин Дж.М. Колчеданные месторождения вулканической ассоциации / Дж.М. Франклин, Дж.У. Лайдон, Д.Ф. Сангстер; под ред. Б.С. Скиннера // Генезис рудных месторождений. – М.: Мир, 1984. – Т. 2. – С. 39–252.
26. Ярошевич В.С. Генетические особенности рудных формаций Кавказа по данным изотопных исследований: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / В.С. Ярошевич. – Тбилиси: Мецниереба, 1985. – 52 с.
27. Akçay M. Geology, mineralogy and geochemistry of the Çayeli massive sulfide ore deposit, Rize, NE Turkey / M. Akçay, M. Arar // In: A. Stanley (ed), Mineral Deposits: Processes to processing, Balkema, Rotterdam. – 1999. – P. 459–462.
28. Altun Y. Geology of the Çayeli-Madenköy copper-zinc deposit and the problems related to mineralization / Y. Altun // Mineral Res. Expl. Bull., Ankara. – 1977. – V. 89. – P. 10–24.
29. Çakir Ü. Geological characteristics of the Aşıköy-Toykundu (Küre-Kastamonu) massive sulfide deposits / Ü Çakir // Mineral. Res. Expl. Bull., Ankara. – 1995. – V. 117. – P. 29–40.
30. De Ronde C.E.J. Hydrothermal fluids associated with seafloor mineralization at two southern Kermadec arc volcanoes, offshore New Zealand / C.E.J. de Ronde, K. Faure, C.J. Bray, D.A. Chappell, I.C. Wright // Mineralium Deposita. – 2003. – V. 38. – P. 217–233.
31. Güner M. Sulphide ores and geology of the Küre area Pontid in N Turkey / M.Güner // Mineral Research and Exploration Bulletin. – 1980. – V. 94. – P. 65–109.
32. Hannington M.D. Gold in sea-floor polymetallic sulfide deposits / M.D. Hannington, J.M. Peter, S.D. Scott // Econ. Geol. – 1986. – V. 81. – P. 1867–1883.
33. Heinrich Ch.A. The physical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study / Ch.A. Heinrich // Mineralium Deposita. – 2005. – V. 39. – P. 864–889.
34. Hodgson C.L. The geological setting of the volcanogenic massive sulfide deposits and active hydrothermal systems: some implications for explorations / C.L. Hodgson, S.M. Lyndon // Canadian Mining Metallurgical Bull. – 1977. – V. 70. – P. 95–106.
35. Mottl M.J. Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalts seawater. Experimental results for Fe, Mn and sulfur species. / M.J. Mottl, H.D. Holland, R.F. Corr // Geochim. et acta. – 1979. – V. 43. – P. 869–884.
36. Kekelia S. Ore-forming systems in volcanogenic-sedimentary sequences by the example of non-ferrous metal deposits of the Caucasus and Eastern Pontides, Ankara (Turkey) / S. Kekelia, M. Kekelia, Z. Otkhmezuri, Ch. Moon, N. Ozgür // Mineral. Res. Expl. Bull. – 2004. – V. 129. – P. 1–16.
37. Lethch Graig H.B. Mineralogy and textures of the Lakhanos and Kizilkaya massive sulphide deposits, Northeastern Turkey, and their similarity to Kuroko ores / H.B. Lethch Graig // Mineralium deposita. – 1981. – V. 16. – P. 241–257.
38. Sherlock R.L. Geological setting of the Rapu Rapu gold-rich volcanogenic massive sulfide deposits, Albay Province, Philippines / R.L. Sherlock, T.I. Barret, P.D. Lewis // Mineralium deposita. – 2003. – V. 38. – P. 813–830.
39. Shepherd T.J. A practical guide to fluid inclusion studies / T.J. Shepherd, A.H. Rankin, D.H.M. Alderton. – Blaskie, Glasgow and London, 1985. – 239 p.
40. Stackelberg I. Van and the shipboard scientific party. Hydrothermal sulfide deposits in backarc spreading centers in the Southwest Pacific / I. Stackelberg // BGC Circular. – 1985. – V. 27. – P. 3–14.
41. Ustaömer T. Late Paleozoic-Early Mesozoic marginal basins along the active southern continental margin of Eurasia: evidence from the Central Pontides (Turkey) and adjacent regions / T. Ustaömer, A.H.F. Robertson // Geological Journal. – 1993. – V. 120. – P. 1–20.

#### References

1. Akimtsev, V.A., Sharapov, V.N. (1993). "Ore" effusives of the rift valley of the Mid-Atlantic Ridge. Reports of the Russian Academy of Sciences, 331, 3, 329–331. [In Russian].
2. Arevadze, V.A. (1989). Physico-chemical conditions of formation of endogenous deposits of Transcaucasus. Abstract for the doctoral thesis. – Tbilisi: Metsniereba, 54 p. [In Russian].
3. Bortnikov, N.C., Vikehtiev, I.V. (2005). Modern Polymetallic sulphide mineralization in the World's ocean. Geology of Ore deposits, 47, 1, 16–50. [In Russian].
4. Fablina, I.F., Mozgova, N.N., Borodaev, U.S., Stelanova, T.V., Cherkashev, G.A., Ilin, M.I. (2000). Association of copper sulfide ores in the modern ocean ore zones in hydrothermal field. Logachev (Mid-Atlantic Ridge, 140651). Geology of Ore deposits, 42, 4, 329–349. [In Russian].
5. Ganeev, I.G. (1989). Transfer of substance by hydrothermal solutions. Notes of Mineralogical Society of SSSR, 1, 3–16. [In Russian].
6. Grinberg, G.A., Krasnov, S.G., Ainemer, A.I., Poroshina, I.M., Stepanova, T.B. (1990). Hydrothermal sulfide mineralization in the ocean. Soviet Geology, 12, 881–891. [In Russian].
7. Grichuk, D.V., Borisov, M.V., Melnikova, G.L. (1984). Thermodynamic model of hydrothermal system in the oceanic crust: assessment of the evolution of the solution. Geology of Ore deposits, 4, 3–24. [In Russian].
8. Gugushvili, V.I., Kekelia, M.A., Mun, Ch., Natsvlshvili, M.P. (2002). The crust and mantle source of Cretaceous volcanism and sulfide mineralization in Bolnisi District. Trudi GIN AN of Georgia. New episode, 117, 412–419. [In Russian].
9. Elianova, E.A. (1989). Formation of composition and structure of the ore at the modern and ancient VMS system. Soviet geology, 12, 17–26. [In Russian].
10. Elianova, E.A. (1999). Formation in modern and ancient submarine VMS ore: composition and structure. Model volcano-sedimentary ore-forming system: abstracts to the International conference. Popov, V.E. (Ed.). Sant Peterburg, 26–27. [In Russian].
11. Elianova, E.A., Mirlin, E.G. (1990). Ocean ore-forming system. Soviet geology, 6, 47–55. [In Russian].
12. Zonenshain, A.P., Kovaliov, A.A. (1974). New global tectonic (plate tectonic). M.: Mir, 471 p. [In Russian].
13. Kekelia, S.A., Iaroshevixh, V.Z., Patman, I.P. (1974). Geological genetic model of Alpine nonferrous metals of the Mediterranean metallogenic belt. Geology and Geophysics, 8, 71–79. [In Russian].
14. Kekelia, C.A., Ambokadze, A.N., Ratman, I.P. (1984). Paleoisland ocanic deposits of nonferrous metals and methods of their prospecting. – Tbilisi: Mtsniereba, 96 p. [In Russian].
15. Krainov, C.P., Matveev, L.I., Solomin, G.A. (1988). Geochemical conditions of deposition of zink and lead from brines of sedimentary basins on sulfide barrier. Geochemistry, 1704–1719. [In Russian].
16. Krivtsov, A.I. (1989). Applied metallogeny. – M.: Nedra, 288 p. [In Russian].
17. Krivtsov, A.I., Nogdanov, U.V., Borodaevskaia, M.B., Genkin, A.D., Kurbanov, N.K., Likhachev, A.P., Migachev, I.F. (1987). Madneuli ore deposit – the type and depositional environment. – M.: Nedra, 197 p. [In Russian].
18. Matsukama, T., Khorikosi, E. (1973). Overview of Kuroko ore deposit in Japan. Tatsumi (Ed.) / Volcanism and ore formation. – M.: Mir, 129–151. [In Russian].
19. Monin, A.C., Zonenshain, L.P. (Ed.). (1987). History of ocean of Tethys. Moscow, Institute of Oceanology, 155 p. [In Russian].
20. Ovchinnikov, L.N. (1988). The formation of ore deposits. – M.: Nedra, 255 p. [In Russian].
21. Prokoptsev, G.N. (1990). The formation of metalliferous fluids on the ocean floor. Proceedings of the SSR Academy of Sciences, Geological series, 4, 34–44. [In Russian].
22. Rona, P. (1986). Hydrothermal mineralization in the spreading areas of the ocean. (1986). – M.: Mir, 160p. [In Russian].
23. Siniakov, V.I. (1986). General ore genetic model of endogenous ore formations. Novosibirsk: Nauka, 243 p. [In Russian].
24. Tvalchrelidze, A.G. (1987). The hydrothermal conditions of formation of massive sulfide ores. – M.: Nedra, 188 p. [In Russian].
25. Franklin, D.J., Laidon, D.J., Sangster, D.F. (1984). Volcanogenic massive sulfide deposits. Genesis of ore deposits. Skinner, B.S. (Ed.). – M.: Mir, 2, 39–252. [In Russian].

26. Iaroshevich, B.Z. (1985). Genetic features of ore formations of the Caucasus according to the isotope studies. Abstract of Candidate thesis. – Tbilisi : Metsniereba, 52 p. [In Russian].
27. Akçay, M., Arar, M. (1999). Geology, mineralogy and geochemistry of the Çayeli massive sulfide ore deposit, Rize, NE Turkey. In: A. Stanley (ed), Mineral Deposits: Processes to processing. Balkema. – Rotterdam, 459–462.
28. Altun, Y. (1977). Geology of the Çayeli-Madenköy copper-zinc deposit and the problems related to mineralization. Ankara, Mineral Res. Expl. Bull., 89, 10–24.
29. Çakir, Ü. (1995) Geological characteristics of the Aşıköy-Toykundu (Küre-Kastamonu) massive sulfide deposits, Mineral. Res. Expl. Bull., 117, Ankara, 29–40.
30. De Ronde, C.E.J., Faure, K., Bray, C.J., Chappell, D.A., Ian, C. Wright, I.C. (2003). Hydrothermal fluids associated with seafloor mineralization at two southern Kermadec arc volcanoes, offshore New Zealand. Mineralium Deposita, 38, 217–233.
31. Güner, M. (1980). Sulphide ores and geology of the Küre area Pontid in N Turkey. Mineral Research and Exploration Bulletin, 65–109.
32. Hannington, M.D., Peter, J.M., Scott, S.D. (1986). Gold in sea-floor polymetallic sulfide deposits. Econ. Geol., 81, 1867–1883.
33. Heinrich, Ch.A. (2005). The physical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study. Mineralium Deposita, 39, 864–889.
34. Hodgson, C.L., Lyndon, S.M. (1977). The geological setting of the volcanogenic massive sulfide deposits and active hydrothermal systems:

some implications for explorations. Canadian Mining Metallurgical Bull, 70, 95–106.

35. Mottl, M.J., Holland, H.D., Corr, R.F. (1979). Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalts seawater. Experimental results for Fe, Mn and sulfur species. Geochim et acta, 43, 869–884.

36. Kekelia, S., Kekelia, M., Otkhmezuri, Z., Moon, Ch., Ozgür, N. (2004). Ore-forming systems in volcanogenic-sedimentary sequences by the example of non-ferrous metal deposits of the Caucasus and Eastern Pontides, Ankara (Turkey), Mineral. Res. Expl. Bull., 129, 1–16.

37. Lethch Graig, H.B. (1981). Mineralogy and textures of the Lakhanos and Kizilkaya massive sulphide deposits, Northeastern Turkey, and their similarity to Kuroko ores. Mineral deposita, 16, 241–257.

38. Sherlock, R.L., Barret, T.J., Lewis, P.D. (2003). Geological setting of the Rapu Rapu gold-rich volcanogenic massive sulfide deposits, Albay Province, Philippines. Mineralium deposita, 38, 813–830.

39. Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M. (1985). A practical guide to fluid inclusion studies. Blaskie, Glasgow and London, 239 p.

40. Stackelberg, I., Van and the shipboard scientific party. (1985). Hydrothermal sulfide deposits in backarc spreading centers in the Southwest Pacific. BGC Circular, 27, 3–14.

41. Ustaömer, T., Robertson, A.H.F. (1993). Late Paleozoic-Early Mesozoic marginal basins along the active southern continental margin of Eurasia: evidence from the Central Pontides (Turkey) and adjacent regions. Geological Journal, 120, 1–20.

Надійшла до редколегії 29.05.17

S. Kekelia, Dr Sci (Geol.-Min.), Chief scientific researcher  
Email: sergokekeliya@yahoo.com, tel: +995 592 082390,  
M. Kekelia, Dr Sci (Geol.-Min.), Head of department  
Email: kekeliya33@yahoo.com, tel: +995 599716984,  
N. Popkhadze, PhD (Geol.), Scientific researcher  
Email: nino\_popkhadze@yahoo.com, tel: +995 599161694,  
N. Gagnidze, PhD (Geol.), Scientific researcher  
Email: nonagagnidze@gmail.com, tel: +995 595515286  
Iv. Javakhishvili Tbilisi State University  
Al. Janelidze Institute of Geology, 31, Politkovskaia Str., Tbilisi, 0186, Georgia

## THE VOLCANOGENIC DEPOSITS OF NON-FERROUS METALS OF PALEOISLAND ARC ENVIRONMENT ASSOCIATED WITH WALL ROCK ALTERATIONS OF HOST ROCKS AND PROBLEMS OF ORE GENESIS (on the example of ore districts in Georgia, Armenia and Turkey)

*The goal of our work is the study of ore wall rock zones of the volcanogenic deposits of non-ferrous metals of paleoisland arc environment (on the example of Madneuli ore deposit) and determination of the conditions of their formations using geochemical and geothermobarometry investigations. Methods: the mapping of the open pit of Madneuli deposit, determination of the content of trace elements by ICP-MS, in the US Geological Survey and Caucasian Institute of Mineral Resources chemical geothermobarometry investigations were held and the isotopic composition of oxygen and hydrogen in the ore was determined. The results: the structural features of ore deposits, character of ore wall rock zones were identified, mineral composition of metasomatic rocks was defined and the multistage formation of deposits was proved. Scientific novelty: at the end the conclusion (including some scientific ideas about the genesis of ore deposits) about genesis of volcanogenic deposits of Alpien paleoisland arc environment taking into account the studies of geothermobarometry investigations by the authors was given. Practical significance: described features of ore wall rock zones can be successfully used in other regions of the world in order to find new volcanogenic ore deposits.*

**Keywords:** Caucasus, Volcanogenic deposits, structure, non-ferrous metals, metasomatic alterations.

C. Кекелія, д-р геол.-мінерал. наук, голов. наук. співроб.  
E-mail: sergokekeliya@yahoo.com, тел: +995 592082390,  
М. Кекелія, д-р геол.-мінерал. наук, зав. Відділом  
E-mail: kekeliya33@yahoo.com, тел: +995 599716984,  
Н. Попхадзе, акад., д-р з геології, наук. співроб.  
E-mail: nino\_popkhadze@yahoo.com, тел: +995 599 161694,  
Н. Гагнідзе, акад., д-р з геології, наук. співроб.  
E-mail: nonagagnidze@gmail.com, тел: +995 595 515286  
Тбіліський державний університет ім. І. Джавахішвілі  
Геологічний інститут, вул. Палітківської, 31, м. Тбілісі, 0186, Грузія

## ВУЛКАНОГЕННІ РОДОВИЩА КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ ПАЛЕОСТРОВОДУЖНИХ СПОРУД І ПРОБЛЕМИ ГЕНЕЗИСУ РУД (на прикладі рудних об'єктів Грузії, Вірменії та Туреччини)

*Мета: вивчення околорудного простору вулканогенних родовищ кольорових металів палеостроводужних споруд (на прикладі Маднеульського родовища) і визначення умов їхнього формування з використанням геохімічних і термобарогеохімічних досліджень.*

*Методи: виконано картування кар'єру Маднеульського родовища, визначено вміст рідкісних і розсіяних елементів на прикладі ICP-MS, у Геологічній службі США і Кавказькому інституті мінеральної сировини проведено термобарогеохімічні дослідження та визначено ізотопний склад кисню і водню в рудах.*

*Результати: виявлено структурні особливості родовища, характер околорудного простору, визначено мінеральний склад метасоматитів і доведено багатостадійність формування родовищ.*

*Наукова новизна: висловлено міркування про генезис вулканогенних родовищ альпійських палеостроводужних споруд з урахуванням виконаних авторами термобарогеохімічних досліджень, а також із залученням існуючих у науковому світі уявлень про генезис родовищ.*

*Практична значимість: описані особливості околорудного простору можуть бути з успіхом використані в інших регіонах світу для пошуків родовищ вулканогенного класу.*

**Ключові слова:** Кавказ, вулканогенні родовища, структура, кольорові метали, метасоматичні зміни.

UDC549 : 553.31 (477.63)

S.Tikhlivets, PhD (in Geology), Senior Lecturer  
 E-mail: tikhlivets.svetlana@gmail.com,  
 V.Filenko, Senior Researcher  
 E-mail: valusha.geol@gmail.com  
 Kryvyi Rih National University  
 37, Pushkina Str., KryvyiRih, 50002, Ukraine

## MINERALOGY OF SODIUM METASOMATITES OF THE PERVOMAYSKE DEPOSIT AND THEIR INFLUENCE ON QUALITY OF IRON ORE CONCENTRATE

*(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук О.В. Дубиною)*

*Nowadays, the exploitation of the Pervomayske deposit is in the northern direction. The large metasomatic bodies of ferruginous quartzites are manifested in the productive strata in the northern part of deposit. The metasomatic bodies of ferruginous quartzites influence technological parameters of the iron ore concentrate. This situation determines the purpose of this investigation. The mineral composition, genesis and technological parameters of riebeckite ferruginous quartzites of the Pervomayske deposit productive strata are studied.*

*The metasomatically changed ferruginous quartzites and features of their mineralogical zoning are examined mineralogically. The zones of riebeckitization are abstracted within the boundaries of metasomatic bodies. The mineral composition, the structural and texture of riebeckite ferruginous quartzites are studied. The technological research for enrichment of riebeckite ferruginous quartzites is conducted.*

*Results of the mineral composition, the structure and the texture investigation, conditions of genesis of riebeckite ferruginous quartzites of riebeckite ferruginous quartzites are given. Generalized regularities in changing of ore technological parameters (iron content in concentrate composition, concentrate ratio, iron recovery in the concentrate, iron losses in mine tailings) in the metasomatic bodies section of deposit's productive strata are presented. The authors studied the influence of sodium metasomatism on technological parameters of riebeckite ferruginous quartzites*

*The results of mineralogical and technological studies of authors have been used as the basis for compiling mineralogical and technological maps for the deposit that are utilized for operation and future mining, for elaborating schemes of optimal iron ores blending before conveying them to concentration plants with the purpose of increasing the iron ore concentrate quality and decreasing iron losses in concentration wastes.*

*Originality consists in detailed carrying out of mineralogical research of riebeckite ferruginous quartzites of the Pervomayske deposit. Further, these results are used in technological tests for enrichment of riebeckite ferruginous quartzites.*

*It is necessary to take into consideration the obtained regularities of the variability for the technological parameters while specifying the mineralogical and technological ores classification and the mineralogical and technological mapping of the Pervomayske deposit.*

**Keywords:** *Ukrainian Shield, Kryvyi Rih basin, Pervomayske deposit, ferruginous-siliceous formation, ferruginous quartzites, metasomatic changes, zone of riebeckitization, dressability.*

**Introduction.** Within the boundaries of ferruginous-siliceous formation in the Kryvyi Rih basin the sodium metasomatites are widely developed. Most intensively they occur in the northern part of the basin at the intersection of two deep-seated faults—Kryvyi Rih—Kremenchuk and Devladove. To the north and south from the Devladove fault zone sodium metasomatites in ores of the Kryvyi Rih series sharply decrease.

The Pervomayske deposit is located within the boundaries of the North iron ore district of the Kryvyi Rih basin. The productive strata of the deposit is composed of the fifth and sixth iron horizons of the Saksagan series. Such geological processes as sedimentogenesis, dynamothermal metamorphism, sodium metasomatism and hypergenesis took part in the formation of the productive strata. Influence of hypergenesis on the quality and ore concentration is negligible. It is connected with the conducting of mining operations at the level of hypsometric horizons in the opencast which are located much lower than the crust of weathering of ferruginous-siliceous formation.

It is difficult to assess the direct influence of sedimentation on ore enrichment, because iron ore sedimentary formations were exposed to dynamothermal metamorphism. As a result their mineral composition, structural and textural features, physical properties have been changed. Main characteristics of the mineralogical and chemical zoning of iron and shale horizons of the Saksagan series are preserved in the metamorphism process.

So, modern condition of magnetite quartzites of the Pervomayske deposit productive strata is due to the manifestation of dynamothermal metamorphism, sodium metasomatism and tectonogenesis. This is confirmed by the presence of about 50 routine mineral varieties of iron ore [19]. The latter are united in essential and accessory mineral varieties. The percentage of unchanged iron quartzites is

about 40 %, riebeckitized ones is about 44 %, catalysed ones is about 10 %, aegirized, silicified and other varieties are up to 1 % of the productive strata of total volume.

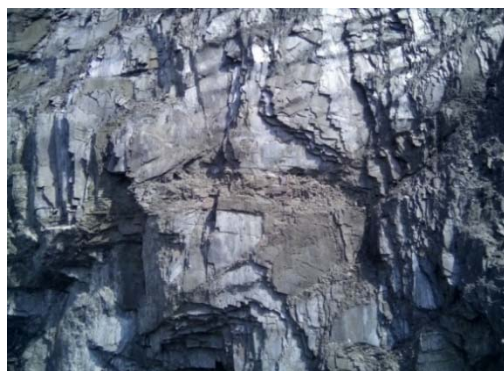
Such diversity of varieties of magnetite quartzites leads to variability of technological parameters of iron ore concentrate. Ores product of enrichment plant (iron content in concentrate composition) is changing between 62–63 wt.% and 67–68 wt.%. So, the main problem of technological stabilization process is solved by identifying of technological parameters' correlation of iron ore concentrate from iron ores composition.

As stated above, the volume of the Pervomayske deposit productive strata comprises riebeckite magnetite quartzites. It is constantly observed in the form of lens-like bodies in the quarry wall (fig. 1). Thickness of these bodies reaches 100–150 meters. In this connection, the authors of the article decided to study mineralogical and chemical composition, structural and texture of riebeckite metasomatites, and their influence on technological parameters of iron ores.

**Research analysis.** During the 50<sup>th</sup>–70<sup>th</sup> years of the 20<sup>th</sup> century sodium metasomatites were the object of active examination of many researchers. They considered the issues of geological positions, mineralogical and chemical composition, structure and texture, metallogenic specialization of metasomatic bodies. [1, 3–5, 8–10, 16–18]. Previous researches [5, 7, 11, 13] proved that genesis of metasomatism had been occurring at an interval 200–400 myr after completion of dynamothermal metamorphism of ferruginous-siliceous sediments (age of rocks, respectively, 1,8±0,05 i 2,2±0,05 Ga). This particularly caused genesis of metasomatic bodies within the boundaries of iron ore series. These bodies influence technological parameters of ferrous ores of the Pervomayske deposit of the Northern Iron Ore Enrichment Works of Kryvyi Rih basin. [14, 15].



a



b

Fig. 1. Outcropping of riebeckite ferruginous quartzites in open-pit side of the Pervomayske deposit

Sodium metasomatism accompanied by aegirineization, riebeckiteization of ferruginous quartzites and albitization of clay shales [5, 6, 12, 13, 15, 21]. There are several opinions on the metasomatite genesis. According to some of them, sodium metasomatites originated as a result, of dynamothermal metamorphism of sodic-ferruginous-siliceous sediments. These sediments were similar to the sediments from the modern volcanic lakes of the East African rift. [22, 23]. Correspondingly to [2, 5, 7, 18] it is believed that in the iron ore strata metasomatic minerals are connected with metasomatizing effect of carbon dioxide sodium hydrothermal fluids on the protogene ferruginous quartzites. The third point of view is based on an assumption of convergency genesis of sodium amphiboles [5, 23] and possibility of metasomatites genesis as a result, of metamorphic, hydrothermal and metasomatic processes.

Most intensively sodium metasomatites occurred within the boundaries of productive strata of the Pervomayske deposit. In smaller quantity they occur within the boundaries of enclosing rocks [15, 21]. Riebeckite, aegirine, albitite and others are metasomatically formed minerals. They are rock-forming minerals of many kinds of metasomatic ferruginous quartzites.

Mineralogical and technological features of ore of ferruginous-siliceous association including Pervomayske deposit were examined by B.I. Pirogov et al. [20]. Authors demonstrated the existence of direct dependence between concentrate quality ( $\beta$ ) and magnetite morphology and anatomy. They also proved a weaker bond of this technological parameter with general content of iron in ore composition ( $Fe_{total.}$ ) and iron content in magnetite ( $Fe_{magn.}$ ). It was sustained that the direct dependence between concentrate ratio ( $\gamma$ ), iron recovery in the concentrate ( $\epsilon$ ) and content of  $Fe_{total.}$  and  $Fe_{magn.}$  in ore composition exists. It was determined that there was no dependence between content of  $Fe_{total.}$ ,  $Fe_{magn.}$  in ore composition and iron losses in mine tailings ( $\theta$ ).

Practical experience of the Northern Iron Ore Enrichment Works shows that technological parameters of magnetite ores of the Pervomayske deposit are characterized by the considerable instability. This is explained with the occurrence of authigenic-metamorphogenic zoning of ore strata, natural ore breaking in zones of faulting and metasomatic changes.

**Objective of research.** Nowadays, the exploitation of the Pervomayske deposit is in the northern direction. The large metasomatic bodies of ferruginous quartzites occur in the productive strata in the northern part of deposit.

The metasomatic bodies are characterized by metasomatic zoning [4, 16, 21, 23] within the boundaries of protogenic mica-hematite-magnetite, magnetite and

cummingtonite-magnetite-quartzites. In peripheral part of the productive strata the magnetite-cummingtonite quartzites rarely underwent metasomatic changes. This fact determines widening of mineralogical classification of iron ores. Generally mineralogical zoning is characterized by changing of metasomatic mineral zones (from the central to the peripheral part of metasomatic body): zone of aegirineization  $\rightarrow$  zone of riebeckiteization  $\rightarrow$  zone of silification  $\rightarrow$  zone of carbonatization  $\rightarrow$  uninvaded zone of ferruginous quartzites [4, 5, 12, 15]. Mineralogical zoning is based on significant changing content of rock-forming minerals and chemical components in mineralogical zones. The objective of this research is the determination of the regularities in mineral and chemical composition of metasomatically altered rocks depending on the intensity of metasomatic processes. As a result, the influence of sodium metasomatism on technological parameters of ferruginous quartzites' metasomatic varieties was studied. In condition of metasomatic changes of ferruginous-siliceous formation rocks the metasomatic zoning is superimposed on protogenic-authigenic-metamorphogenic zoning. The metasomatic zoning succeeds features of protogenic-authigenic-metamorphogenic zoning. As a result, these polygenic (sedimentation + metamorphism + metasomatism) bodies are complex in structure and variable in mineral and chemical composition within the boundaries of metasomatic zones.

The quantity of sodium (riebeckite) metasomatites exceeds 90 % of the total volume of metasomatites in the Pervomayske deposit. In connection with this, the mineralogical composition, structure and texture of riebeckite varieties of ferruginous quartzites and variability of their technological parameters are considered below.

**Laying out the main material.** Ferruginous quartzites, which are specific in composition, structure and texture, are referred to sodium metasomatites. They are composed of such rock-formed minerals as aegirine, riebeckite (rhodosite) and albitite. The affluent minerals include tetraferrous biotite, celadonite, apatite, zircon and other minerals. Sodium metasomatic bodies are characterized by the variety of forms and sizes. Veins, mineralization zones of crumpling and brecciation are the most common forms. The large lensoid bodies have the thickness of 100–150 meters and the length of 500–700 meters (rarely to 2000 meters).

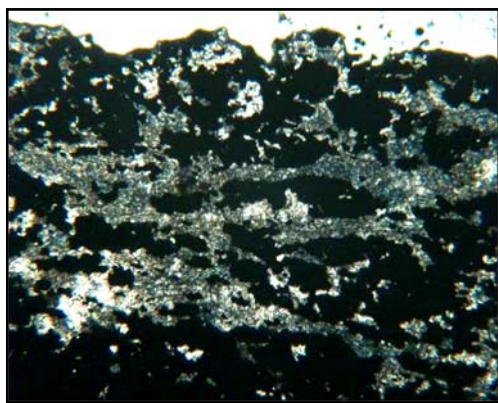
When the Pervomayske deposit researched topomineralogically it was defined that mineralogical zoning is the characteristic feature of the metasomatic bodies. It is found in the maximum in thick strata. Within the boundaries of productive strata the mineralogical zoning is characterized by above mentioned metasomatic mineral zones. This zoning is poorly developed or absent in small metasomatic zones and zones of crush. In shales of the

third-fifth horizon, the veins and lensoid bodies of sodium metasomatites are found in close spatial connection with the thick zones of desalination of the ferruginous quartzites. The third-fifth horizon interlays productive strata.

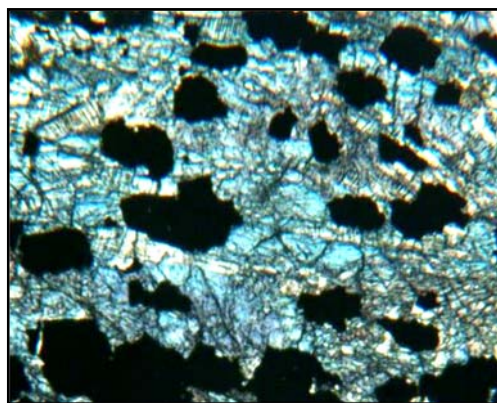
**Zone of aegirineization** is zone of maximum metasomatic reconversion of ferruginous quartzites. If disregard the late-magmatic and postmagmatic minerals (carbonites, quartz, hematite, riebeckite and other) the composition of aegirinite metasomatites is bimineral (aegirine + magnetite). Magnetite is relic. Mineral composition of aegirinites does not depend on content of protogenic ferruginous quartzites. Scaly texture of protogenic ferruginous quartzites is succeeded with aegirinite metasomatites. But the thickness of ore and nonore interbeds decreases due to the removal of silica and metasomatic compression. The thickness of aegirineization zone is changing from 10s centimeters to 20–30 meters. Some bodies are 70–100 meters thick.

**Zone of riebeckiteization** is traced by the replacement of quartz, magnetite and hematite with riebeckite. Affluent minerals are tetraferrousbiotite, celadonite, carbonates, aegirine. Thickness of riebeckiteization zone is changing from

tens centimetres to 4–50 meters, rarely 70 meters. Prolongation is 30–400 meters. These zones were formed as a result of influence of the metasomatic dissolutions on the protogenic ferruginous quartzites, and the increase of value of thermodynamic characteristics (sodium temperature activity, fugitivity of oxygen). It caused the greater dependence of mineralogical characteristics of riebeckite metasomatites from the composition of protogenic ferruginous quartzites. If riebeckite metasomatites are formed by micaceous-hematite-magnetite and magnetite quartzites, the substantial part of the protogenic metamorphogenic micaceous-hematite and quartz has been preserved. In this case, riebeckite is close to the stoichiometric composition. Riebeckiteization of cumingtonite-magnetite quartzites occurred through pseudomorphosis of magnetite and magnesioriebeckite. According to the microscopic observations the neocrystallisation of the magnesioriebeckite is 1–20 % of its total amount from the composition of metasomatites. Structurally and texturally, riebeckite metasomatites retain the main features of protogenic ferruginous quartzites (fig. 2). In this connection they are called riebeckite metasomatites or riebeckite varieties of ferruginous quartzites.



a



b

Fig. 2. Processes of riebeckiteization in ore (a) and non ore (b) interbeds of magnetite quartzites. Microscopic observations in translucent light. Nicol prism II. Zoom, In 50<sup>x</sup>. White – quartz; black – magnetite; blue – riebeckite; green – aegirine

**Zone of silification** is characteristic for almost all metasomatic bodies. This zone is diagnosed by external signs. They show significant content of quartz, appearance of rich silification sections of enclosing rocks and presence of cross-cutting quartz veins. Ore and non ore interbeds of ferruginous quartzites are exposed to the processes of silification. As a result, the content of magnetite (in ore interbeds) and hematite (in non ore interbeds) is lower than their content in the unaltered ferruginous quartzites. In zone of silification affluent minerals are riebeckite, tetraferrousbiotite, celadonite, carbonates, rarely aegirine. Thickness of zone of silification is changing from 7–10 meters to 40–50 meters.

Genesis of this zone was connected with "rundown" of silicon with metasomatic battery solutions. The "rundown" process took place from central metasomatic zones of riebeckiteization and aegirineization to periphery of metasomatic bodies. Secondary ferruginous quartzites are characterized by complex morphology of magnetite

individuals and aggregates (in the consequence of their partial replacement) and filling of protogenic ferruginous quartzites' grikes and vugs with secondary quartz.

The riebeckite varieties of ferruginous quartzites are widely developed within the boundaries of the fifth and sixth ferruginous horizons of the Pervomayske deposit. It is connected with the considerable thickness of the riebeckiteization zone of metasomatic bodies.

The authors investigated 104 mineralogical samples of riebeckite metasomatites in a face of the quarry of Pervomayske deposit. The mineral composition was identified in samples of the riebeckite metasomatites with a view to clarifying the existing data. The authors studied mineral composition on the base scientific and research mineralogical laboratory at the department of geology and applied mineralogy of Kryvyi Rih National University. Intermediate mineral composition of riebeckite metasomatites is shown in Table 1.

**Table 1. Intermediatemineral composition(vol.%) of riebeckitemetasomatites**

Minerals	Riebeckitemetasomatites, which formed for such mineral varieties of ferruginous quartzites			
	micaceous-hematite-magnetite quartzites	magnetitequartzites	cummingtonite-magnetite quartzites	magnetite-cummingtonite quartzites
quartz	23,74	24,48	24,34	26,76
magnetite	25,94	33,14	28,70	17,44
micaceous-hematite	5,05	0,95	0,25	0,16
cummingtonite	0,00	0,04	1,77	4,15
biotite	0,00	0,00	0,05	1,15
aegirine	0,54	0,41	0,30	0,17
riebeckite, magnesioriebeckit	41,78	37,79	41,31	46,54
albite	0,00	0,00	0,00	0,06
tetraferrousbiotite	0,39	0,34	0,11	0,07
celadonite	0,44	0,42	0,28	0,22
ferruginous talcum	0,12	0,08	0,06	0,06
carbonates <sup>1</sup>	1,15	1,28	1,44	1,55
sulfides <sup>2</sup>	0,19	0,22	0,27	0,29
apatite	0,12	0,15	0,18	0,21
other minerals <sup>3</sup>	0,54	0,70	0,94	1,17
Total	100,00	100,00	100,00	100,00
Quantity of definitions	26	27	25	26

<sup>1</sup>Carbonates: calcite, dolomite, ferodolomite, reralsideroplesite, pistomessite.

<sup>2</sup>Sulphides: pyrite, pyrotine, chalcopyrite, arsenopyrite, marcasite.

<sup>3</sup>Other minerals: chlorite, garnet, stilpnomelane, tourmaline, zircon.

According to the results of the mineralogical studies the authors discovered that the largest content of riebeckite (46,54 vol. %) was characterized for riebeckitization zones of metasomatites, which were originated from magnetite-cummingtonite quartzites. This phenomenon is due to a significant content of silicates (cummingtonite) in protogenic ferruginous quartzites. Sodium amphibole (riebeckite) displaced cummingtonite in the process of metasomatism.

The content of the commercial component (magnetite) is slightly changed. In micaceous-hematite-magnetitequartzites the content of magnetite is 29,96 vol. %, averagely. In the riebeckite varieties of the micaceous-hematite-magnetite

quartzites the content of magnetite is 25,94 vol. %. It is 4 % different. The same situation is observed in other varieties of ferruginous quartzites and their metasomatitic bodies in the deposit. The content of quartz decreased more than twice. It makes easier the enrichment process of the mentioned ores. To prove that the authors have carried out technological research to select the methods of riebeckite ferruginous quartzites enrichment of the Pervomayske deposit. Technological testing were carried out scientific and research mineralogical laboratory at the department of geology and applied mineralogy of Kryvyi Rih National University. The obtained data are given in the Table 2.

**Table 2. Technological parameters of riebeckitemetasomatites of ferruginous quartzites**

Varieties of ferruginous quartzites	Chemical parameters, %		Technological parameters, %			
	Fe <sub>total</sub>	Fe <sub>magn.</sub>	β	γ	ε	□
Micaceous-hematite-riebeckite-magnetitequartzites	40,6	26,7	67,7	46,2	76,1	20,5
Magnetite-riebeckite-quartzites	40,8	33,8	68,8	49,1	83,4	11,7
Cummingtonite-magnetite-riebeckitequartzites	33,4	26,0	68,5	40,7	81,8	9,6

It was established that the quality of magnetite concentrate obtained from riebeckite varieties is high and stable ( $\beta = 68-69$  mass. %) depending on the protogenic magnetite quartzites of the deposit (Table 2). This is due to relatively weak displacement of magnetite (ore mineral) by riebeckite in comparison to other zones of metasomatic bodies (zone of aegirineization and silification). In addition, moderate metasomatic changes contributed the first displacement of disseminated magnetite by riebeckite and simplification of the form of large individuals and aggregates of magnetite. Possibly, this improves the release of magnetite during ore crushing and also promotes improvement of recovery of magnetite in the concentrate and low losses of magnetite in mine tailings.

Concentrate ratio ( $\gamma$ ) and iron recovery in the concentrate ( $\epsilon$ ) are monitored with the content of magnetite in ore composition and proportion of magnetite and other iron-bearing minerals (micaceous-hematite, cummingtonite). The highest technological parameters (concentrate ratio 49,1%, iron recovery in the concentrate 83,4 %) are characterized for riebeckitemetasomatites, depending on the magnetite quartzites of the deposit. This is explained with the high content of magnetite in protogenic magnetite quartzites.

The values of general iron losses in the process of enrichment ( $\eta$ ) depend on the content of relic high-ferrous nonmagnetite minerals (cummingtonite, micaceous-hematite, and neogenicriebeckite and aegirine) in the ore composition. This parameter causes the character of variability for iron losses in the process of enrichment in the riebeckite varieties of ferruginous quartzites. This largest parameter is for micaceous-hematite-riebeckite-magnetitequartzites ( $\eta = 20,5$  %) and the lowest one – for cummingtonite-magnetite-riebeckitequartzites.

In the previously published works of one of the authors, data were obtained on the enrichment of the aegirine and silicified varieties of ferruginous quartzites in the Northern Region of the Kryvyi Rih basin [15]. Analyzing the obtained data, we can conclude that the technological parameters of riebeckite varieties of ferruginous quartzites ( $\beta = 67,7-68,8$  %) are larger than the technological parameters of aegirine ( $\beta = 66,6$  %) and silicate ( $\beta = 61,8-66,4$  %) ferruginous quartzites.

**Conclusions.** 1. Within the boundaries of the Pervomayske deposit productive strata the developed sodium metasomatism is imposed on the protogenic magnetite quartzites, thus forming the inhomogeneity of the mineral iron ore composition.



2. Riebeckitezating ferruginous quartzites comprise the significant amount (about 44 % of the total volume of productive strata) of mineral varieties of ferruginous quartzites. Mineralogical research showed a significant variation in composition of riebeckite varieties of ferruginous quartzites. This phenomenon is due to superimposition of the metasomatic zoning on protogenicauthigenic-metamorphogenic zoning. The authors of article showed that the largest content of riebeckite (46,54 vol. %) is characterized for cummingtonite-magnetite-riebeckitequartzites. The obtained data specificate the mineral composition of riebeckitezating ferruginous quartzites, which were uncovered in the third ore body within the boundaries of the Pervomayske deposit.

3. During technological investigation it was defined that sodium metasomatism has different effects on the of technological parameters changing. The most positive effect is observed in riebeckitemetasomatites depending on originating from the protogenic micaceous-hematite-magnetite, magnetite and cummingtonite-magnetite quartzites. This is caused combinations of following factors: the improvement of ore morphological features, internal structure of individuals and aggregates of magnetite, the character of extensional interrelation of individuals and aggregates of magnetite and no ore minerals under the action of sodium metasomatism. The best technological parameters ( $\beta$  and  $\gamma$ ) are characterized for magnetite-riebeckitequartzites. This is due to the proportion of magnetite and other minerals in protogenic magnetitequartzites.

4. It is necessary to take into consideration the obtained regularities of the variability for the technological parameters while specificating the mineralogical and technological ores classification and mineralogical and technological mapping of deposit.

#### Список використаних джерел

- Белевцев Я.Н. О золотой минерализации в метасоматитах докембрия / Я.Н. Белевцев, И.И. Сахацкий, О.Ф. Макивчук // Геолог. журн. – 1972. – Т. 32, № 1. – С. 137–138.
- Генезис железных руд Криворожского бассейна / Я.Н. Белевцев, Г.Г. Бура, Р.П. Дубинкина и др. – К.: Изд.-во АН УССР, 1959. – 308 с.
- Евтехов В.Д. Особенности минерало-технологического картирования месторождений в метасоматически измененных железистых кварцитах (на примере Кривбасса) / В.Д. Евтехов // Онтогенез минералов и технологическая минералогия. – К.: Наук. думка, 1988. – С. 82–92.
- Евтехов В.Д. Основные закономерности локализации натриевых метасоматитов в железисто-кремнистых формациях докембрия / В.Д. Евтехов // Геолог.-минерал. вiсн. Криворiзького технiчного ун-ту. – 2000. – № 1–2. – С. 3–11.
- Евтехов В.Д. Генетическая и прикладная минералогия натриевых метасоматитов железисто-кремнистых формаций Украинского щита (по природным и экспериментальным данным): автореф. дис. ... д-ра. геол.-минерал. наук: 04.00.20 / В.Д. Евтехов. – Л., 1992. – 40 с.
- Евтехов В.Д. Об особенностях состава и свойств рибекитов Северного Криворожья / В.Д. Евтехов, Л.И. Полтавец // Докл. АН УССР. Сер. Б. – 1980. – № 5. – С. 13–15.
- Елисеев Н.А. Метасоматиты Криворожского рудного бассейна / Н.А. Елисеев, А.П. Никольский, В.Г. Кушев // Тр. Лабор. геологии докембрия АН СССР. – М.; Л.: Изд. АН СССР, 1961. – Вып. 13. – 204 с.
- Железисто-кремнистые формации докембрия Европейской части СССР. Структуры месторождений и рудных районов / Я.Н. Белевцев, А.В. Вайло, В.В. Ветренников и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 156 с.
- Железисто-кремнистые формации докембрия Европейской части СССР. Минералогия / Б.И. Пирогов, Ю.М. Стебновская, В.Д. Евтехов и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 168 с.
- Железисто-кремнистые формации докембрия Европейской части СССР. Метаморфизм / Р.Я. Белевцев, О.Я. Беляев, В.В. Ветренников и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 148 с.
- Занкевич Б.А. О структурной позиции щелочных метасоматитов Первомайского железорудного месторождения Кривбасса / Б.А. Занкевич, В.Д. Евтехов, Д.Н. Кондратьева // Роль структурных и структурно-геохимических факторов в рудообразовании. – К.: Изд.-во ИГФМ АН УССР, 1980. – С. 21–24.
- Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических пород / Г.П. Зарайский. – М.: Наука, 1989. – 344 с.
- Зональность натриевых метасоматитов в железистых кварцитах Северного Криворожья / В.Д. Евтехов, Г.П. Зарайский, В.Н. Балашов, О.К. Валева // Очерки физико-химической петрологии. – М.: Наука, 1988. – № 15. – С. 17–37.

14. Карпенко С.В. Топомінералогія залізисто-кремністої формації Ганнівського родовища Криворізького басейну: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.20 / С.В. Карпенко. – К., 2011. – 22 с.

15. Карпенко С.В. Влияние минералогической зональности продуктивной толщи Анновского месторождения на обогатимость руд / С.В. Карпенко // Пробл. недропользования: междунар. форум-конкурс. – СПб., 2010. – С. 34–36.

16. Карпенко С.В. Генетические разновидности рибекита Анновского месторождения Криворожского бассейна / С.В. Карпенко, В.Д. Евтехов // Геолог.-минерал. вiсн. – 2008. – № 2 (20). – С. 33–41.

17. Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов / Д.С. Коржинский // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях: – М.: Изд.-во АН СССР. – 1955. – С. 335–456.

18. Куман В.Е. Геохимические и минерало-петрографические данные натрового метасоматоза в докембрийских железисто-кремнистых формациях (на примере Криворожья) / В.Е. Куман // Контроль и технология процессов обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1971. – Вып. 1. – С. 126–135.

19. Минералогическое изучение руд Первомайского месторождения Северного ГОКа с определением технологических показателей выделенных разновидностей руд и оконтуривание залежей руд с разными показателями обогащения / В.Д. Евтехов, Т.А. Олейник, Е.В. Евтехов и др. – НИР № 711 / 17-927-12. – КНУ, 2013. – 120 с.

20. Минерало-технологическое картирование железорудных месторождений Северного Криворожья / Б.И. Пирогов, В.Д. Евтехов, Д.Н. Кондратьева, Е.М. Романюк, П.Н. Хартанович, Л.И. Полтавец // Горный журн. – 1980. – № 10. – С. 12–15.

21. Половинкина Ю.И. Натровый метасоматоз как закономерность в образовании месторождений железистых кварцитов / Ю.И. Половинкина // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. – 1949. – № 78, № 1. – С. 52–58.

22. Скаржинский В.И. О некоторых особенностях условий образования щелочных амфиболов в центральной части Криворожского бассейна / В.И. Скаржинский // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. – 1958. – № 2. – С. 230–233.

23. Стрыгин А.И. Метасоматоз в железорудных толщах украинского докембрия / А.И. Стрыгин, Л.П. Казаков, В.А. Белоус // Геолог. журн. – 1988. – № 6. – С. 25–33.

#### Reference

- Belevtzev, Ya.N., Sahatzkiy, I.I., Makivchuk, O.F. (1972). About gold mineralization in metasomatites of Precambrian. *Geological journal*, 32, 1, 137–138. [In Ukrainian].
- Belevtzev, Ya.N., Bura, G.G., Dubinkina, R.P. et al. (1959). Genesis of ferrous ore in Kryvyi Rih basin. Kyiv: ANUSSR, 308 p. [In Ukrainian].
- Evtexhov, V.D. (1988). Features of the mineralogical and technological mapping of deposit in metasomatic changes ferruginous quartzites (for example of Krivbas). *Ontogeny of minerals and technological mineralogy*. Kyev: Naukova dumka, 82–92. [In Ukrainian].
- Evtexhov, V.D. (2000). The main regularities of sodium metasomatites localization in the ferruginous-siliceous formations of the Precambrian. *Geological and Mineralogical Journal of Kryvyi Rih Technical University*, 1–2, 3–11. [In Ukrainian].
- Evtexhov, V.D. (1992). Genetic and applied mineralogy of sodium metasomatites in the ferruginous-siliceous formations of the Ukrainian shield (according to natural and experimental data). Extended abstract of Doctor's thesis (Mineralogy, Crystallography). Kyiv, Vernadsky Nation Library of Ukraine, 40 p. [In Ukrainian].
- Evtexhov, V.D., Poltavets, L.I. (1980). On the features of the composition and properties of riebeckites in the North Kryvyi Rih. *Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Series B*, 5, 13-15. [In Ukrainian].
- Eliseev, N.A., Nikolsky, A.P., Kushev, V.G. (1961). Metasomatites of the Kryvyi Rih Ore Basin. Proceedings of the Laboratory of Precambrian Geology of the USSR Academy of Sciences. Moscow-Leningrad: Publ. of Academy of Sciences of the USSR, 13, 204 p. [In Russian].
- Belevtzev, J.N., Vailo, A.V., Vtrennikov, V.V. et al. (1989). The ferruginous-siliceous formations of the Precambrian in the European part of the USSR. Structures of deposits and ore regions. Kyiv: Naukova Dumka, 156 p. [In Ukrainian].
- Pirogov, B.I., Stebnovskaya, U.M., Evtexhov, V.D. et al. (1989). The ferruginous-siliceous formations of the Precambrian in the European part of the USSR. Mineralogy. Kyiv: Naukova dumka, 168 p. [In Ukrainian].
- Belevtzev, R.Ya., Belyaev, O.Ya., Vtrennikov, V.V. (1989). The ferruginous-siliceous formations of the Precambrian in the European part of the USSR. Metamorphism. Kyiv: Naukova dumka, 148 p. [In Ukrainian].
- Zankevich, B.A., Evtexhov, V.D., Kondratieva, D.N. (1980). On the structural position of sodium metasomatites in the Pervomayske iron ore deposit of Kryvbas. The role of structural and structural-geochemical factors in ore formation. Kyiv: IGFM AN UkSSR, 21–24. [In Ukrainian].
- Zarayskiy, G.P. (1989). Zoning and formation conditions of metasomatic rocks. Moscow: Nauka, 344 p. [In Russian].
- Evtexhov, V.D. Zarayskiy, G.P., Balashov, V.N., Valeev, O.K. (1988). Zoning of sodium metasomatites in ferruginous quartzites in the Northern Kryvyi Rih. Essays on physico and chemical petrology. Moscow: Nauka, 15, 17–37. [In Russian].
- Karpenko, S.V. (2011). Topominalogy of Hannivka deposit feriferous-flinty formation at Kryvyi Rih basin. Extended abstract of PhD thesis (Mineralogy, Crystallography). Kyiv: Vernadsky Nation Library of Ukraine, 22 p. [In Ukrainian].

15. Karpenko, S.V. (2010). Influence of mineralogical zoning of the Annovskoye deposit productive strata on the ore enrichment. Problems of subsoil use: international forum-competition. St. Petersburg, 34–36. [In Russian].

16. Karpenko, S.V., Evtekhov, V.D. (2008). Genetic varieties of riebeckite in the Annovskoye deposit of the Krivoy Rog basin. *Geological and Mineralogical Journal*, 2 (20), 33–41. [In Ukrainian].

17. Korzhinsky, D.S. (1956). Essay on metasomatic processes. Basic problems in the theory of magmatogenic ore deposits. Moscow: AN USSR, 335–456. [In Russian].

18. Kuman, V.E. (1971). Geochemical and mineralogical-petrographic data of sodium metasomatism in Precambrian ferruginous-siliceous formations (by the example of Krivorozhye). Control and technology of enrichment process. Moscow: Nedra, 1, 126–135. [In Russian].

19. Evtekhov, V.D., Oleynik, T.A., Evtekhov, E.V. (2013). Mineralogical study of the Pervomayske deposit ore of the North Mining Ore enrichment Combine with finding of technological parameters of substract varieties ore

and delination ore delf with different parameters of enrichment. № 711 / 17-927-12. KNU, 120 p. [In Ukrainian].

20. Pirogov, B.I., Evtekhov, V.D., Kondratieva, D.N., Romanyuk, E.M., Khartanovich, P.N., Poltavets, L.I. (1980). Mineralogical and technological mapping of iron ore deposits in the North Krivoy Rog region. *Mining Journal*, 10, 12–15. [In Russian].

21. Polovinkina, Yu.Ir. (1949). Sodium metasomatism as a regularity in the formation of ferruginous quartzites deposits. *Russian Mineralogical Society*, 78, 1, 52–58. [In Russian].

22. Skarzhynsky, V.I. (1958). On some features of the conditions for the formation of sodium amphiboles in the central part of the Krivoy Rog basin. *Russian Mineralogical Society*, 87, 2, 230–233. [In Ukrainian].

23. Strygin, A.I., Kazakov, L.R., Belous, V.A. (1988). Metasomatism in the iron ore strata in the Ukrainian Precambrian. *Geological Journal*, 6, 25–33. [In Ukrainian].

Надійшла до редколегії 11.10.17

С. Тихливець, канд. геол. наук, старш. викладач

E-mail: tikhlivets.svetlana@gmail.com,

В. Філенко, старш. наук. співроб., зав. лаб.

E-mail: valentina.filenko@mail.ru

Криворізький національний університет

вул. Пушкіна, 37, м. Кривий Ріг, 50002, Україна

## МИНЕРАЛОГИЯ НАТРИЕВЫХ МЕТАСОМАТИТОВ ПЕРВОМАЙСЬКОГО РОДОВИЩА ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ ЗАЛІЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТУ

*На сучасний момент розробка Первомайського кар'єра ведеться в північному напрямку. У цій частині родовища в межах продуктивної товщі спостерігаються крупні, метасоматично змінені тіла залізистих кварцитів, які значною мірою впливають на технологічні показники залізородного концентрату. Саме це й обумовлює мету даної роботи – вивчення мінерального складу, структури та текстури, умов утворення рибекітових різновидів залізистих кварцитів Первомайського родовища, а також їхніх технологічних показників.*

*Мінералогічне дослідження метасоматично змінених залізистих кварцитів та особливостей їхньої мінералогічної зональності виконувалось за стандартною методикою. Було виділено в межах метасоматичних тіл зони рибекітизації та вивчено їхній мінеральний та структурно-текстурний склад. Було проведено технологічні дослідження із збагачення рибекітових різновидів залізистих кварцитів.*

*У роботі наведено результати вивчення мінерального складу, структури та текстури рибекітових різновидів залізистих кварцитів, а також умов їхнього утворення. Проаналізовано узагальнені закономірності зміни основних технологічних параметрів руд (вміст заліза у складі концентрату, вихід концентрату, вилучення заліза до концентрату, втрати заліза у хвостах збагачення) у розрізі метасоматичних тіл продуктивної товщі родовища. Авторами було досліджено вплив натрієвого метасоматозу на технологічні показники рибекітових різновидів залізистих кварцитів.*

*Результати топомінералогічних і технологічних досліджень було використано як основу для розробки мінералогічної й технологічної карт родовища, що застосовуються при оперативному і перспективному плануванні гірничодобувних робіт, складанні схем оптимального усереднення залізних руд перед подачею їх на збагачувальні фабрики з метою підвищення якості залізородного концентрату і зменшення втрат заліза у відходах збагачення.*

*Наукова новизна полягає в детальному проведенні мінералогічних досліджень рибекітованих залізистих кварцитів продуктивної товщі Первомайського родовища. А також у подальшому використанні цих результатів у технологічних випробуваннях із збагачення рибекітованих залізистих кварцитів.*

*Отримані закономірності мінливості технологічних показників метасоматично змінених руд у розрізі продуктивної товщі необхідно врахувати при уточненні мінерально-технологічної класифікації руд і при мінералого-технологічному картуванні родовища.*

*Ключові слова:* Первомайське родовище, залізисто-кремениста формація, залізисті кварцити, метасоматичні зміни, зона рибекітизації, збагачувальність.

С. Тихливець, канд. геол. наук, ст. препод.

E-mail: tikhlivets.svetlana@gmail.com,

В. Філенко, ст. науч. сотр., зав. лаб.

E-mail: valusha.geol@gmail.com

Криворізький національний університет

ул. Пушкіна, 37, г. Кривой Рог, 50002, Украина

## МИНЕРАЛОГИЯ НАТРИЕВЫХ МЕТАСОМАТИТОВ ПЕРВОМАЙСЬКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА

*На сегодняшний день разработка Первомайского карьера ведется в северном направлении. В этой части месторождения в пределах продуктивной толщи наблюдаются крупные метасоматически измененные тела железистых кварцитов, которые в значительной мере влияют на технологические показатели железородного концентрата. Эта ситуация и обуславливает цель данной работы – изучение минерального состава, структуры и текстуры рибекитовых разновидностей железистых кварцитов Первомайского месторождения, условий их образования, а также технологических показателей.*

*Минералогические исследования метасоматически измененных железистых кварцитов и особенностей их минералогической зональности выполнялись по стандартной методике. Были выделены в пределах метасоматических тел зоны рибекитизации, изучен их минеральный, структурно-текстурный состав. Были проведены технологические исследования по обогащению рибекитовых разновидностей железистых кварцитов.*

*Приведены результаты изучения минерального состава, структуры и текстуры рибекитовых разновидностей железистых кварцитов, а также условий их образования. Проанализированы обобщенные закономерности измененных основных технологических параметров руд (содержание железа в составе концентрата, выход концентрата, извлечение железа в концентрат, потери железа в хвостах обогащения) в разрезе метасоматических тел продуктивной толщи месторождения. Авторы изучили влияние натриевого метасоматоза на технологические показатели рибекитовых разновидностей железистых кварцитов.*

*По результатам топоминералогических и технологических исследований были построены геолого-минералогическая и геолого-технологическая карты месторождения, которые используются при оперативном и перспективном планировании добычи руд, составлении схем их оптимального усреднения перед подачей на обогатительные фабрики, повышения качества железородного концентрата, уменьшения потерь железа в отходах обогащения.*

*Научная новизна состоит в детальном проведении минералогических исследований рибекитованных железистых кварцитов продуктивной толщи Первомайского месторождения, а также в дальнейшем использовании этих результатов в технологических испытаниях по обогащению рибекитованных железистых кварцитов.*

*Полученные закономерности вариативности технологических показателей метасоматически измененных руд в разрезе продуктивной толщи необходимо учитывать при уточнении минерально-технологической классификации руд и минералого-технологическом картировании месторождения.*

*Ключевые слова:* Первомайское месторождение, железисто-кремнистая формація, железистые кварциты, метасоматические изменения, зона рибекитизации, обогатимость.

УДК 553.94:550.428

В. Ішков, канд. геол.- мінерал. наук, доц.

E-mail: ish-w@yandex.ua,

Є. Козій, заст. директора ННЦ ПІГ

E-mail: koziyes@ntnu.org.ua

Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет"  
пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49600, Україна

## ПРО РОЗПОДІЛ ТОКСИЧНИХ І ПОТЕНЦІЙНО ТОКСИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ВУГІЛЛІ ПЛАСТА С<sub>7</sub><sup>H</sup> ШАХТИ "ПАВЛОГРАДСЬКА" ПАВЛОГРАДСЬКО-ПЕТРОПАВЛІВСЬКОГО ГЕОЛОГО-ПРОМИСЛОВОГО РАЙОНУ

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

Підвищення вимог до охорони навколишнього середовища та врахування впливу вугледобувних підприємств на екологічну обстановку обумовлює потребу в нових науково обґрунтованих методах прогнозу вмісту токсичних і потенційно токсичних елементів (ТіПТЕ) у видобувній шахтами гірничій масі, відходах видобутку і вуглезбагачення.

Розглядаються результати досліджень ТіПТЕ у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>H</sup> поля шахти "Павлоградська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Донбасу. Мета роботи – встановлення закономірностей в розподілі ТіПТЕ у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>H</sup>.

У результаті виконаних досліджень встановлено варіації вмісту і середні концентрації ТіПТЕ у вугіллі пласта, побудовано карти ізоконцентрат ТіПТЕ і карти регіональної складової їхнього вмісту по площі шахтопласта. Побудовані карти є фактологічною основою для довгострокового прогнозу концентрацій ТіПТЕ у видобутій шахтою гірській масі. Розраховано лінійні рівняння регресії між концентраціями токсичних і потенційно токсичних елементів та основними технологічними параметрами. Ці рівняння можуть бути використані для короткострокового і середньострокового прогнозу і контролю вмісту ТіПТЕ у видобувній гірській масі. У свою чергу, дово-, середньо- і короткострокові прогнози концентрацій ТіПТЕ мають слугувати підставою для технологічних рішень, спрямованих на зниження їхнього вмісту в продуктах вугледобутку, продуктах і відходах вуглезбагачення.

Аналіз результатів статистичної обробки геохімічної інформації і геолого-структурної характеристики пласта с<sub>7</sub><sup>H</sup> поля шахти "Павлоградська" дозволив встановити, що формування асоціації кобальту, нікелю, ванадію, свинцю, хрому та марганцю пов'язано із збагаченням цими елементами приконтрактних зон вугільного пласта і генетично обумовлене впливом адсорбційного і окислювально-відновлювального бар'єру на міграцію речовини в процесі діагенезу і катагенезу вуглеводородної товщі. Доведено, що берилій є єдиним елементом, переважно пов'язаним з органічною складовою вугілля. Асоціація ртуті і мши'яку обумовлена їх генетичним зв'язком з сульфідною мінералізацією тріщинуватих зон тектонічної природи.

Основне наукове значення результатів виконаних досліджень полягає у встановленні генетичних причин, які чинять істотний вплив на особливості розподілу ТіПТЕ у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>H</sup>.

**Ключові слова:** вугільний пласт, потужність, зола, сірка, токсичні і потенційно токсичні елементи, карти ізоконцентрат, карти регіональної складової, рівняння регресії.

**Вступ.** Досліджувана територія розташована в межах Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Західного Донбасу і адміністративно належить до Павлоградського району Дніпропетровської області. Зростання вимог до охорони навколишнього середовища обумовлює потребу в нових науково обґрунтованих методах прогнозу вмісту токсичних і потенційно токсичних елементів (ТіПТЕ) у видобувній шахтами гірській масі та відходах видобутку і вуглезбагачення. Особлива актуальність даної проблеми визначається Законом України "Про надра", постановами Кабінету Міністрів України № 22 від 30.09.95 та № 688 від 28.06.97, а також нормативними документами ДКЗ [4].

**Останні досягнення.** Раніше В. Ішковим спільно з А. Чорнобук, Д. Михальчонок, В. Дворецьким [5–9] досліджено особливості розподілу деяких ТіПТЕ у продуктах і відходах збагачення ряду вуглезбагачувальних фабрик Донбасу. Водночас, розгляд і аналіз розподілу ТіПТЕ у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>H</sup> шахти "Павлоградська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району раніше не виконувалися.

**Мета роботи:** встановити закономірності в розподілі ТіПТЕ у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>H</sup> поля шахти "Павлоградська" ПАТ "ДТЕК Павлоградвугілля".

**Виклад основного матеріалу. Методика досліджень.** Розгляд розподілу ТіПТЕ в геологічних об'єктах різного характеру і масштабу є необхідним для встановлення законів їхньої міграції, концентрації і розсіювання. Особливість виконаних досліджень полягала в неможливості безпосереднього спостереження цих процесів. У цьому випадку розгляд динаміки процесів традиційно виконується шляхом порівняння статистичних даних та аналізу картографічних матеріалів щодо розподілу хімічних елементів в розглянутих об'єктах. Потім одержані

результати інтерпретуються з урахуванням фізико-хімічних і геологічних особливостей.

Отже, отримання інформації про розподіл хімічних елементів у геологічних об'єктах є першим етапом дослідження, що йде від узагальнення фактичного матеріалу, через його теоретичне осмислення до перевірки виявлених закономірностей дослідним шляхом.

Проби відбиралися у гірських виробках (пластові проби, відібрані борозновим способом [3]) і з дублікатів керна особисто авторами та за участю співробітників геологічних служб вугледобувних підприємств і виробничих геологорозвідувальних організацій в період з 1981 по 2013 рр. Обсяг контрольного випробування становив 5 % від загального обсягу проб. Усі аналітичні роботи виконувалися в центральних сертифікованих лабораторіях виробничих геологорозвідувальних організацій. Вміст Hg визначався атомно-абсорбційним аналізом, As за [1], інші ТіПТЕ – кількісним емісійним спектральним аналізом [2]. На внутрішній лабораторний контроль направлено 6 % дублікатів проб. Зовнішньому лабораторному контролю піддано 10 % дублікатів проб. Якість результатів аналізів (правильність і відтворюваність) оцінювалася як значимість середньої систематичної похибки, що перевіряється за допомогою критерію Стьюдента, і значимість середньої випадкової похибки, яка перевіряється за допомогою критерію Фішера. Оскільки вказані вище похибки при рівні значимості 0,95 є незначними, якість аналізів визнано задовільною.

На початковому етапі обробки первинної геохімічної інформації за допомогою програм Excel 2016 і Statistica 6,0 розраховувалися значення основних описових статистичних показників (вибіркового середнього арифметичного, його стандартної похибки, медіани, ексцесу, моди, стандартного відхилення, дисперсії вибірки, мінімального і максимального значення вмісту, коефіцієнта варіації,

асиметрії вибірки), виконувалась побудова частотних гістограм вмісту і встановлення закону розподілу ТіПТЕ.

З метою виявлення складу геохімічних асоціацій були розраховані коефіцієнти кореляції (r) між вмістом ТіПТЕ. В єдину геохімічну асоціацію об'єднувалися елементи, в яких зв'язок між вмістом описується коефіцієнтом кореляції, що перевищує 0,5, з рівнем значимості не менше 95 %.

При оцінці зв'язку токсичних і потенційно токсичних елементів з органічною або мінеральною частиною вугілля використовувалися коефіцієнти спорідненості з органічною речовиною  $F_o$ , що показують відношення вмісту елементів у вугіллі з малою (< 1,6) і високою щільністю (> 1,7); коефіцієнти наведеної концентрації  $F_{нк}$ , що показують відношення вмісту елементів у фракції і(Ci) до вмісту у вихідному вугіллі; коефіцієнти кореляції вмісту досліджуваних елементів і зольності вугілля і коефіцієнти наведеного вилучення елементів у фракції різної щільності.

При побудові всіх карт використовувалася програма Surfer 11. У ході побудови карт, графіків і розрахунку коефіцієнтів кореляції всі значення концентрацій ТіПТЕ нормувалися за формулою

$$X_{норм} = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}),$$

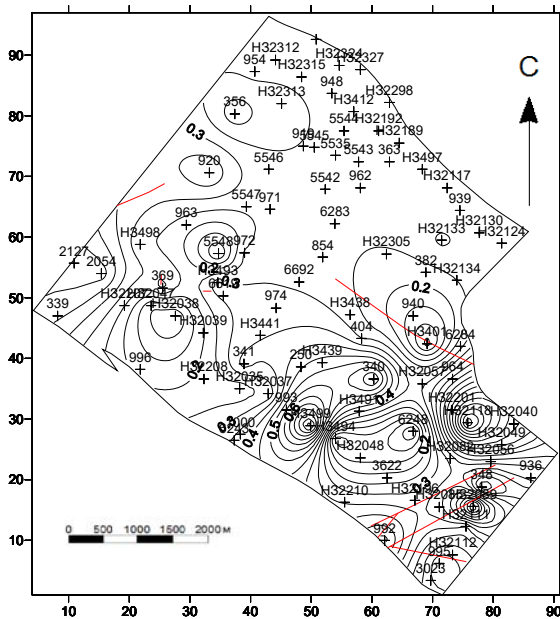
де  $X_i$  – результат одиничного визначення концентрації елемента,  $X_{max}$  – результат максимального визначення концентрації елемента,  $X_{min}$  – результат мінімального визначення концентрації елемента.

Нормування здійснювалося для приведення вибірок до одного масштабу.

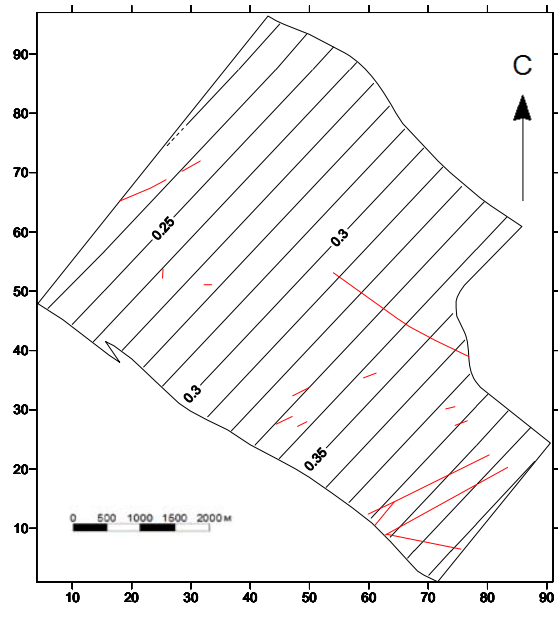
**Закономірності зміни вмісту миш'яку.** Вміст As у вугіллі пласта (рис. 1, а) характеризується значними варіаціями. Він змінюється в межах від 4,01 г/т до 20,34 г/т і не пов'язаний з напрямком падіння, глибиною та потужністю вугільного пласта, концентрацією золи вугілля. Середнє значення вмісту миш'яку по пласту становить 9,27 г/т. Найбільше значення вмісту As – у південно-східній частині шахтного поля. Воно просторово збігається із свердловиною № Н32118. Карта зміни регіональної складової концентрації As, представлена на (рис. 1, б), показує збільшення його вмісту у вугіллі пласта  $c_7^H$  в південно-східному напрямку. Миш'як формує геохімічну асоціацію із ртуттю ( $r = 0,76$ ) і пов'язаний із вмістом у вугіллі сірки загальної ( $r = 0,78$ ). Лінійні рівняння регресії:

$$As = 0,1436 + 0,7889 \times Hg;$$

$$As = 0,2385 + 0,7269 \times S_{зар}.$$



а



б

Рис. 1. Карта ізоконцентрат вмісту As (а) та карта зміни регіональної складової концентрації As (б) у вугіллі пласта  $c_7^H$

**Закономірності зміни вмісту берилію.** Коливання концентрації Be у вугіллі пласта – від 1,87 г/т до 3,65 г/т (рис. 2, а), при середньому значенні – 2,95 г/т. Найбільші значення вмісту берилію – у південній частині шахтного поля на ділянці св. № 995 і № 348. Концентрація Be не залежить від глибини, потужності пласта та вмісту загальної сірки у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього

елемента зростає в напрямку падіння пласта, у північно-східному напрямку (рис. 2, б).

Спостерігається тісна зворотна статистична залежність між вмістом Be і золою ( $r = -0,88$ ), фтором ( $r = -0,81$ ). Лінійні рівняння регресії:

$$Be = 0,9131 - 1,0225 \times A^d;$$

$$Be = 0,9173 - 0,9943 \times F.$$

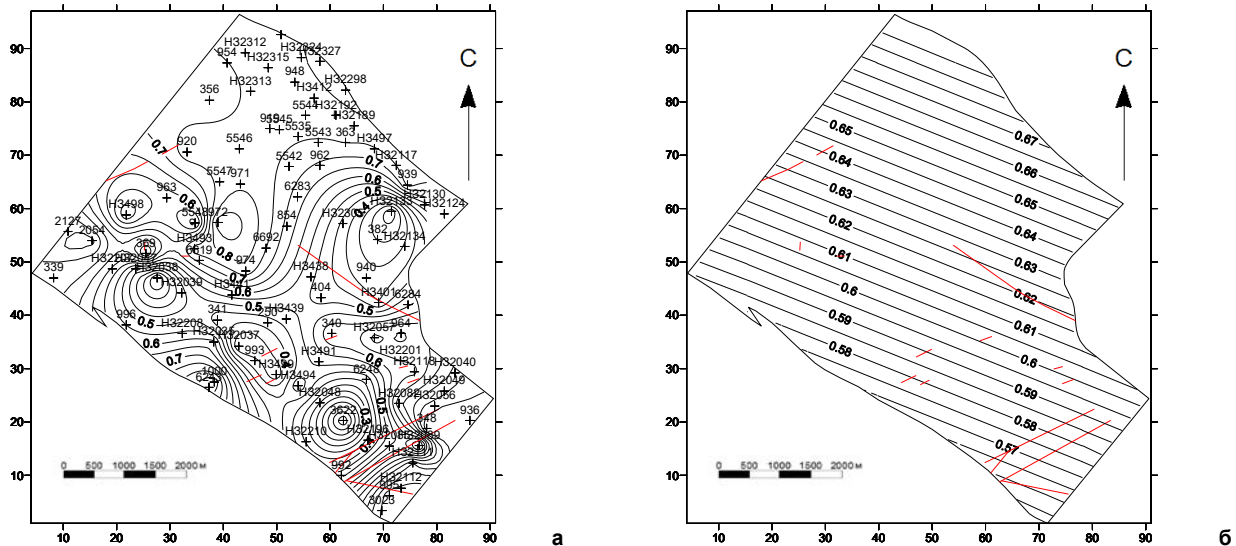


Рис. 2. Карта ізоконцентрат вмісту Ве (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Ве (б) у вугіллі пласта с<sub>7</sub>''

**Закономірності зміни вмісту кобальту.** Вміст кобальту змінюється в межах від 3,17 г/т до 10,22 г/т (рис. 3, а). Середнє значення концентрації кобальту по пласту становить 6,33 г/т. Максимальне значення встановлено в західній частині шахтного поля на ділянці св. № Н32038. Концентрація Со не залежить від глибини, вмісту загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту Со зростає в північно-східному напрямку падіння пласта в бік УКЩ (рис. 3, б).

Установлено тісний зворотний зв'язок між вмістом кобальту і потужністю вугільного пласта ( $r = -0,80$ ), тісний прямий зв'язок з кумуляцією марганцю ( $r = 0,76$ ), нікелю

( $r = 0,66$ ), свинцю ( $r = 0,85$ ), хрому ( $r = 0,84$ ), ванадію ( $r = 0,74$ ). Лінійні рівняння регресії:

$$\text{Co} = 0,6346 - 0,5463 \times m;$$

$$\text{Co} = 0,1261 + 0,7604 \times \text{Pb};$$

$$\text{Co} = 0,1622 + 0,727 \times \text{Mn};$$

$$\text{Co} = 0,0844 + 0,8552 \times \text{Cr};$$

$$\text{Co} = 0,1721 + 0,5291 \times \text{Ni};$$

$$\text{Co} = 0,1645 + 0,7873 \times \text{V}.$$

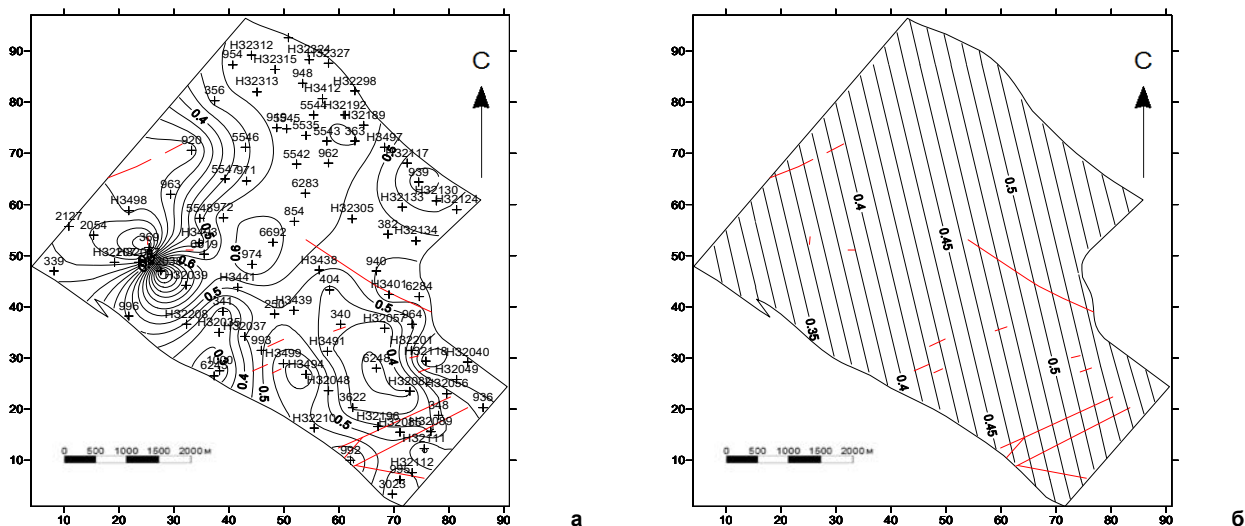


Рис. 3. Карта ізоконцентрат вмісту Со (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Со (б) у вугіллі пласта с<sub>7</sub>''

**Закономірності зміни вмісту марганцю.** Концентрація марганцю варіює від 92,95 г/т до 219,41 г/т (рис. 4, а). Середнє значення вмісту марганцю по пласту становить 142,73 г/т. Найбільше значення приурочено до ділянки пласта біля св. № Н32038, яка знаходиться у західній частині шахтного поля. Кумуляція Mn не залежить від глибини, вмісту загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього елемента також зростає у напрямку падіння пласта (рис. 4, б).

Виявлено тісний зворотний зв'язок між вмістом марганцю і потужністю вугільного пласта ( $r = -0,83$ ), тісний

прямий зв'язок з концентрацією кобальту ( $r = 0,76$ ), нікелю ( $r = 0,74$ ), свинцю ( $r = 0,81$ ), хрому ( $r = 0,75$ ), ванадію ( $r = 0,77$ ). Лінійні рівняння регресії:

$$\text{Mn} = 0,6045 - 0,6173 \times m;$$

$$\text{Mn} = 0,0544 + 0,8005 \times \text{Pb};$$

$$\text{Mn} = 0,0058 + 0,865 \times \text{Co};$$

$$\text{Mn} = 0,0314 + 0,851 \times \text{Cr};$$

$$\text{Mn} = 0,0552 + 0,6482 \times \text{Ni};$$

$$\text{Mn} = 0,0674 + 0,9045 \times \text{V}.$$

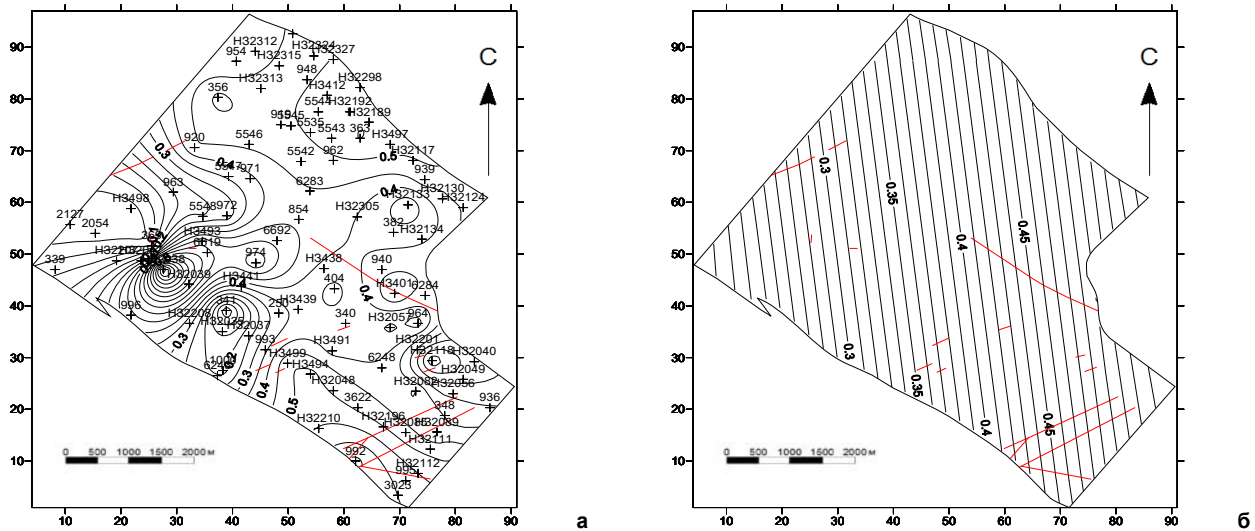


Рис. 4. Карта ізоконцентрат вмісту Mn (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Mn (б) у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>н</sup>

**Закономірності зміни вмісту нікелю.** Кумуляція нікелю коливається в межах від 15,37 г/т до 32,97 г/т (рис. 5, а). Середнє значення по пласту становить 24,56 г/т. Ділянка з найбільшим значенням концентрації нікелю міститься в західній частині шахтного поля біля

св. № Н32038. Вміст Ni не залежить від глибини, концентрації загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього елемента зростає в північно-східному напрямку падіння пласта (рис. 5, б).

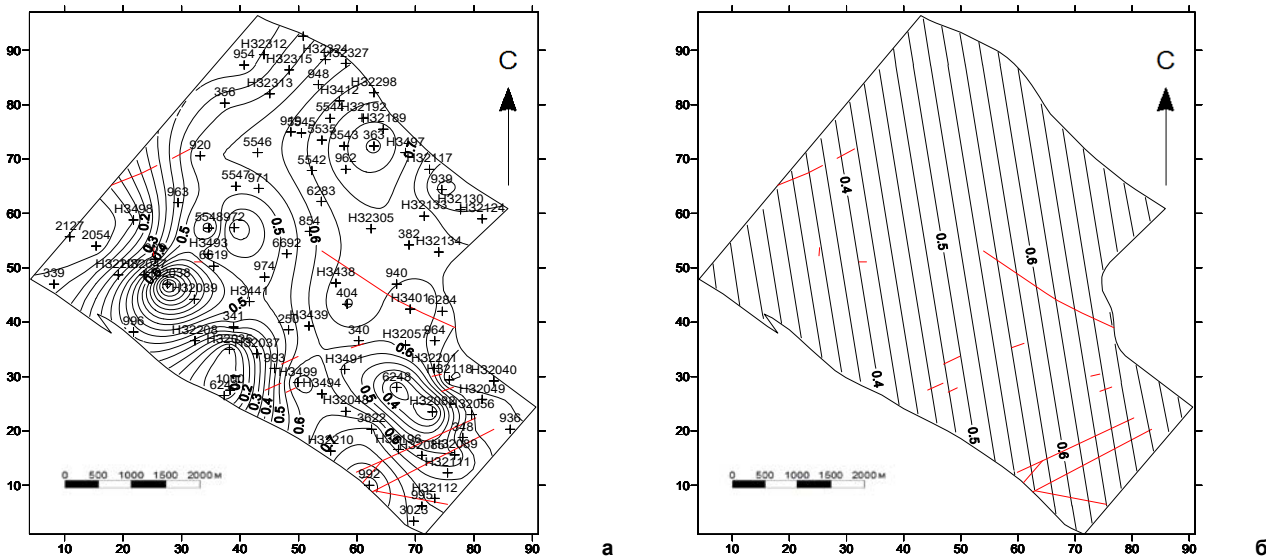


Рис. 5. Карта ізоконцентрат вмісту Ni (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Ni (б) у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>н</sup>

Установлено тісний зворотний зв'язок між вмістом нікелю і потужністю вугільного пласта ( $r = -0,78$ ), тісний прямий зв'язок з концентрацією кобальту ( $r = 0,66$ ), марганцю ( $r = 0,74$ ), свинцю ( $r = 0,75$ ), хрому ( $r = 0,71$ ), ванадію ( $r = 0,70$ ). Лінійні рівняння регресії:

$$Ni = 0,7752 - 0,7217 \times m;$$

$$Ni = 0,1669 + 0,838 \times Pb;$$

$$Ni = 0,1449 + 0,8412 \times Co;$$

$$Ni = 0,1471 + 0,881 \times Cr;$$

$$Ni = 0,1812 + 0,866 \times Mn;$$

$$Ni = 0,1815 + 0,9444 \times V.$$

**Закономірності зміни вмісту ртуті.** Зони підвищеного вмісту ртуті розташовані в південній і південно-східній частині шахтного поля. Концентрація Hg варіює в межах від 0,0037 г/т до 0,1138 г/т (рис. 6, а). Середнє значення по пласту становить 0,0286 г/т. Найбільша кумуляція Hg – в південній частині шахтного поля біля св. № Н3499. Вміст Hg не залежить від глибини, потужності пласта та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього елемента зростає в південно-східному напрямку (рис. 6, б).

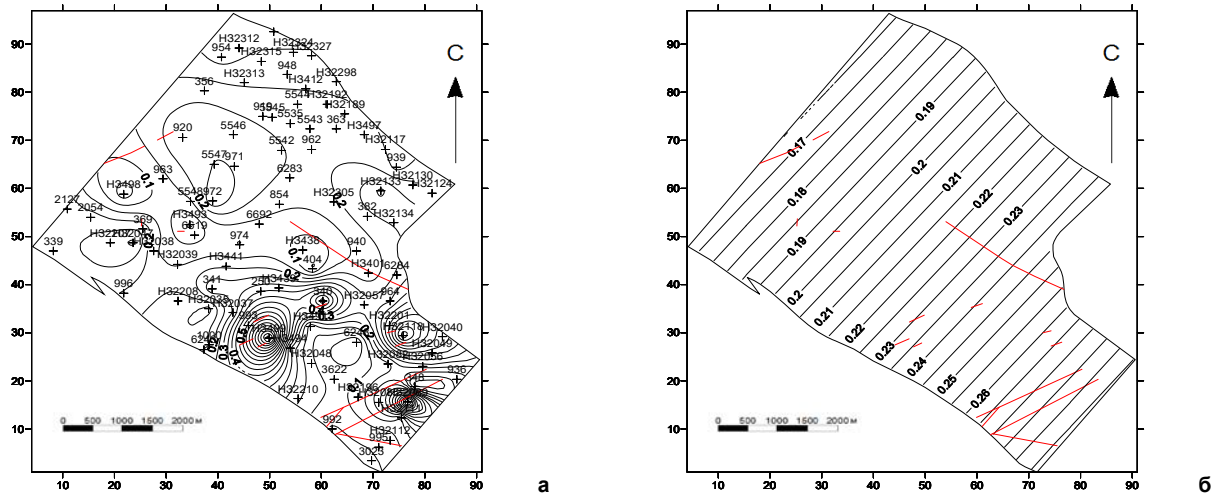


Рис. 6. Карта ізоконцентрат вмісту Hg (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Hg (б) у вугіллі пласта с<sup>н</sup>

Установлено тісний прямий зв'язок між вмістом ртуті і сірки загальної у вугіллі пласта ( $r = 0,91$ ) та з концентрацією миш'яку ( $r = 0,76$ ). Лінійні рівняння регресії:

$$Hg = 0,1326 + 0,8144 \times S_{\text{зар.}}$$

$$Hg = -0,0172 + 0,7557 \times As.$$

**Закономірності зміни вмісту свинцю.** Вміст свинцю в межах пласта змінюється від 6,97 г/т до 21,52 г/т. Середнє значення по пласту становить 13,14 г/т. Найбільша концентрація встановлена в західній частині шахтного поля на ділянці св. № Н32038 (рис. 7, а). Концентрація Pb не залежить від глибини, вмісту загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту Pb зростає в напрямку падіння пласта, у північно-східному напрямку (рис. 7, б).

Установлено тісний зворотний зв'язок між вмістом свинцю і потужністю вугільного пласта ( $r = -0,89$ ), тісний прямий зв'язок з кумуляцією марганцю ( $r = 0,81$ ), нікелю ( $r = 0,75$ ), кобальту ( $r = 0,85$ ), хрому ( $r = 0,86$ ), ванадію ( $r = 0,80$ ). Лінійні рівняння регресії:

$$Pb = 0,6722 - 0,7165 \times m;$$

$$Pb = -0,0146 + 0,9778 \times Co;$$

$$Pb = 0,0833 + 0,8651 \times Mn;$$

$$Pb = 0,0126 + 0,9662 \times Cr;$$

$$Pb = 0,0699 + 0,6779 \times Ni;$$

$$Pb = 0,0758 + 0,9649 \times V.$$

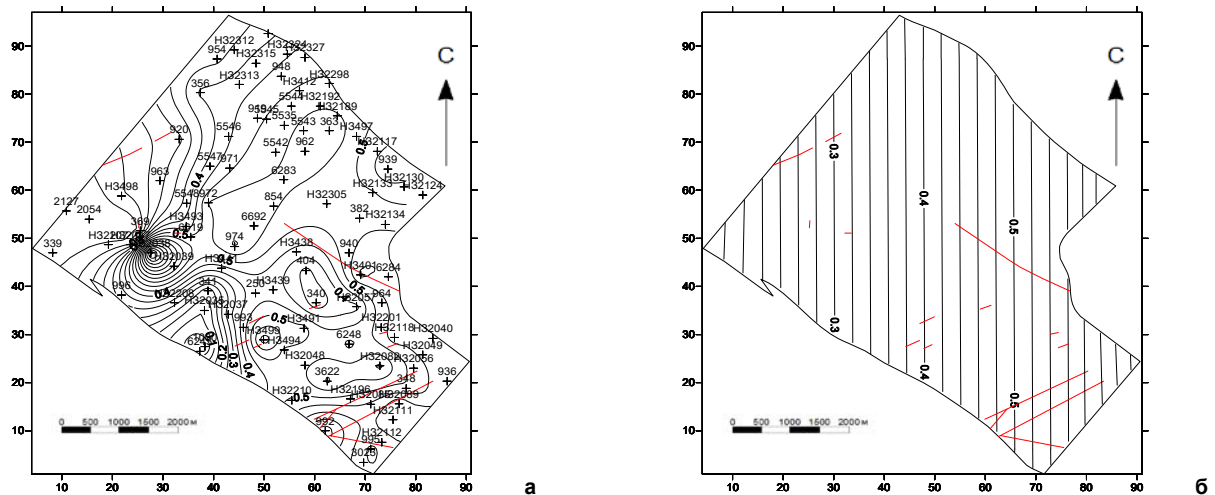


Рис. 7. Карта ізоконцентрат вмісту Pb (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Pb (б) у вугіллі пласта с<sup>н</sup>

**Закономірності зміни вмісту фтору.** Вміст фтору змінюється в межах від 25,69 г/т до 142,63 г/т. Середнє значення по пласту становить 62,29 г/т. Максимальне значення концентрації фтору фіксується на ділянці біля св. № 3622 (рис. 8, а). Кумуляція F не залежить від гли-

бини, вмісту загальної сірки та потужності пласта. Регіональна складова вмісту F зростає в південно-західному напрямку (рис. 8, б).

Установлено тісний прямий зв'язок концентрації F із вмістом золи ( $r = 0,89$ ). Лінійне рівняння регресії:

$$F = 0,0634 + 0,8314 \times A^d.$$

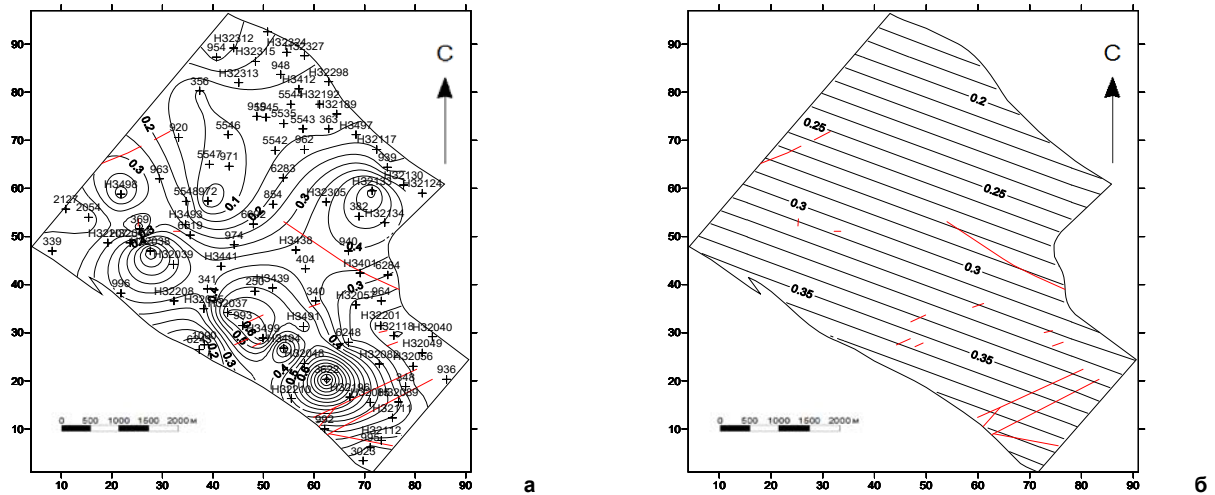


Рис. 8. Карта ізоконцентрат вмісту F (а) та карта зміни регіональної складової концентрації F (б) у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>H</sup>

**Закономірності зміни вмісту хрому.** Вміст хрому варіює в межах від 6,89 г/т до 23,75 г/т. Середнє значення по пласту становить 14,07 г/т. Найбільше значення спостерігається в західній частині шахтного поля

на ділянці із св. № Н32038 (рис. 9, а). Концентрація Cr не залежить від глибини, вмісту загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту Cr зростає по падінню пласта у північно-східному напрямку (рис. 9, б).

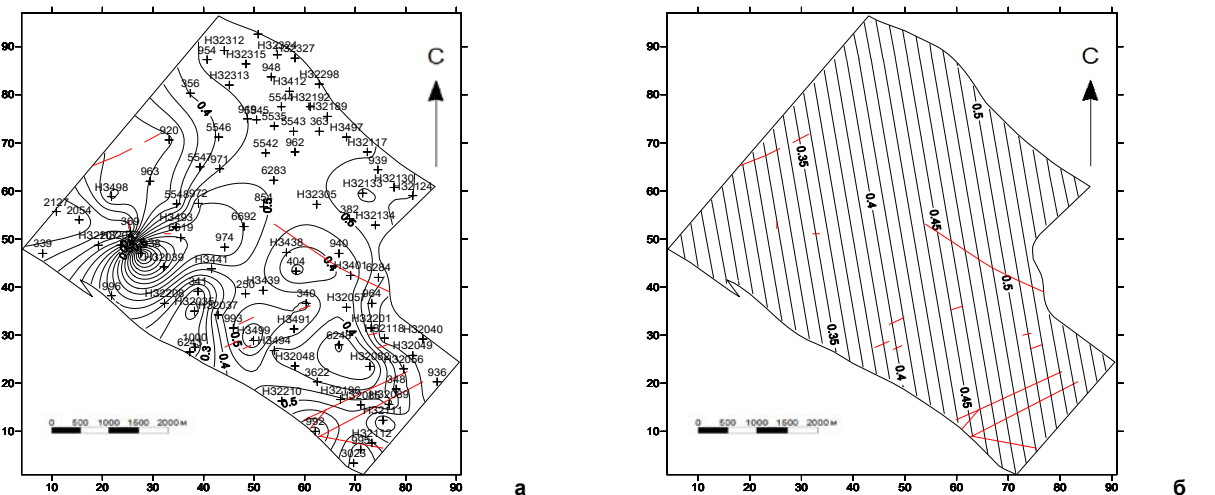


Рис. 9. Карта ізоконцентрат вмісту Cr (а) та карта зміни регіональної складової концентрації Cr (б) у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>H</sup>

Установлено тісний зворотний зв'язок між вмістом хрому і потужністю вугільного пласта ( $r = -0,85$ ), тісний прямий зв'язок з кумуляцією марганцю ( $r = 0,75$ ), нікелю ( $r = 0,71$ ), свинцю ( $r = 0,86$ ), кобальту ( $r = 0,84$ ), ванадію ( $r = 0,78$ ). Лінійні рівняння регресії:

$$\begin{aligned} Cr &= 0,6192 - 0,568 \times m; \\ Cr &= 0,0942 + 0,782 \times Pb; \\ Cr &= 0,1326 + 0,7444 \times Mn; \\ Cr &= 0,0266 + 0,89 \times Co; \\ Cr &= 0,1245 + 0,5768 \times Ni; \\ Cr &= 0,1198 + 0,8481 \times V. \end{aligned}$$

**Закономірності зміни вмісту ванадію.** Кумуляція ванадію коливається в межах від 13,31 до 37,78 г/т (рис. 10, а). Середнє значення по пласту становить 22,13 г/т. Ділянка з найбільшим значенням концентрації V розташована в західній частині шахтного поля біля св.

№ Н32038. Вміст V не залежить від глибини, концентрації загальної сірки та золи у вугіллі. Регіональна складова вмісту цього елемента зростає в південно-східному напрямку (рис. 10, б).

Установлено тісний зворотний зв'язок між вмістом ванадію і потужністю вугільного пласта ( $r = -0,84$ ), тісний прямий зв'язок з концентрацією кобальту ( $r = 0,74$ ), марганцю ( $r = 0,77$ ), свинцю ( $r = 0,80$ ), хрому ( $r = 0,78$ ), нікелю ( $r = 0,70$ ). Лінійні рівняння регресії:

$$\begin{aligned} V &= 0,5199 - 0,4803 \times m; \\ V &= 0,0743 + 0,6756 \times Pb; \\ V &= 0,0428 + 0,7088 \times Co; \\ V &= 0,0484 + 0,7337 \times Cr; \\ V &= 0,0913 + 0,6844 \times Mn; \\ V &= 0,0814 + 0,5349 \times Ni. \end{aligned}$$



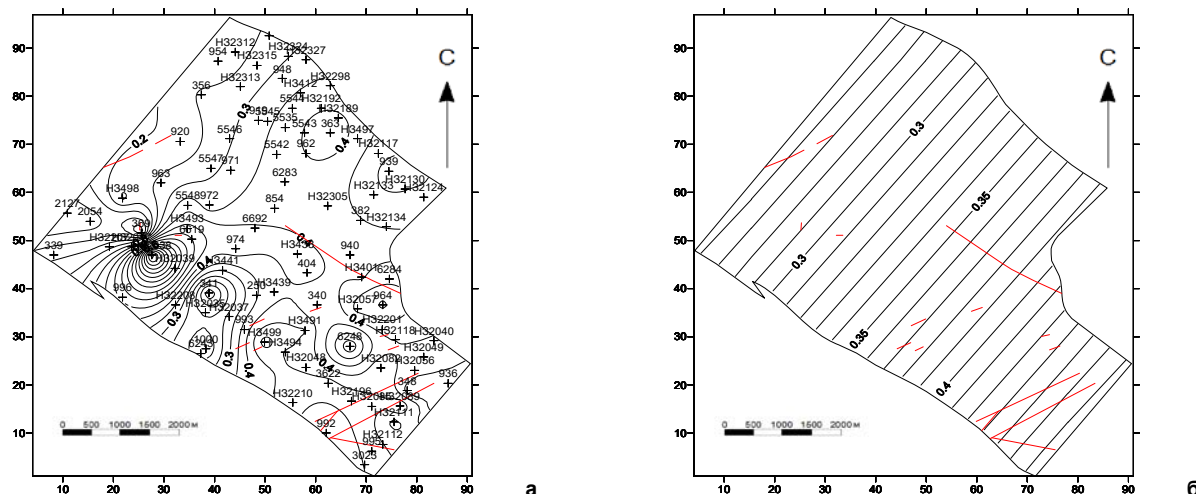


Рис. 10. Карта ізоконцентрат вмісту V (а) та карта зміни регіональної складової концентрації V (б) у вугіллі пласта с<sub>7</sub><sup>н</sup>

**Висновки.** Отримані в процесі досліджень результати дозволяють сформулювати такі основні висновки:

1. Спільне накопичення Co, Ni, Pb, Cr, V і Mn з утворенням геохімічної асоціації й тісний негативний зв'язок концентрацій цих елементів з потужністю вугільного пласта обумовлені їхнім спільним накопиченням у приконтатних ділянках пласта з формуванням своєрідних зон збагачення потужністю 0,15–0,2 м. У свою чергу, утворення подібних зон пов'язано з інтегральним впливом адсорбційного та окисно-відновного геохімічних бар'єрів на контактах вугільного пласта при міграції рухомих форм речовини вугленосної товщі в процесі її діagenезу та катагенезу.

2. Берилій є єдиним елементом з усіх ТіПТЕ, який переважно пов'язаний з органічною складовою вугілля пласта.

3. Тісний кореляційний зв'язок асоціації Hg і As з S<sub>зар.</sub> та аналіз просторового розташування аномалій цих елементів з геолого-структурними особливостями шахтопласта свідчить про накопичення цих елементів на постсидиментаційному етапі формування вугленосних відкладів та їхнього генетичного зв'язку з розривними структурами. Причому, якщо великі розривні порушення відігравали в основному роль підвідних і транзитних каналів, то дрібні порушення, і особливо оперяючі їх зони тріщинуватості, виконували контролюючу функцію.

4. Тісний прямий кореляційний зв'язок F із зольністю вугілля та аналіз побудованих карт свідчить про його переважне накопичення в процесі формування палеоторф'яника у складі шаруватих алюмосилікатів.

Основне наукове значення виконаної роботи полягає у встановленні геохімічних асоціацій ТіПТЕ і генетичних причин їхньої мінливості у вугіллі пласта, а також у виявленні полігенного і поліхронного характеру їхнього накопичення.

Практичне значення отриманих результатів полягає в побудові карт ізоконцентрат ТіПТЕ у вугіллі пласта і розрахунку рівнянь регресії між їхнім вмістом і основними технологічними параметрами.

#### Список використаних джерел

- ГОСТ 10478-93. Топливо твердое. Методы определения мышьяка. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 13 с.
- ГОСТ 28974-91. Угли бурые, каменные и антрациты. Методы определения бериллия, бора, марганца, бария, хрома, никеля, кобальта, свинца, галлия, ванадия, меди, цинка, молибдена, иттрия и лантана. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 8 с.

3. ГОСТ 9815-75. Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Метод отбора пластовых проб. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 6 с.

4. Инструкция по изучению токсичных компонентов при разведке угольных и сланцевых месторождений / отв. ред. В.П. Клер. АН СССР, Ин-т литосферы. – М., 1982. – 84 с.

5. Ишков В.В. Новые данные о распределении ртути, мышьяка, бериллия и фтора в угле основных рабочих пластов Павлоград-Петропавловского геолого-промышленного района / В.В. Ишков // Наук. вісн. НГАУ. – 2012. – № 38. – С 19–27.

6. Ишков В.В. О закономерностях распределения токсичных и потенциально токсичных элементов в угольных пластах Павлоград-Петропавловского района / В.В. Ишков, А.Л. Лозовой // Наук. вісн. НГАУ. – 2001. – № 2. – С 57–61.

7. Ишков В.В. О распределении бериллия, фтора, ванадия, свинца и хрома в продуктах и отходах обогащения Добропольской ЦОФ / В.В. Ишков, А.И. Чернобук, Д.Я. Михальченко // Наук. вісн. НГАУ. – 2001. – № 4. – С. 89–90.

8. Ишков В.В. О распределении бериллия, фтора, ванадия, свинца и хрома в продуктах и отходах обогащения Краснолиманской ЦОФ / В.В. Ишков, А.И. Чернобук, В.В. Дворецкий // Наук. вісн. НГАУ. – 2001. – № 5. – С. 84–86.

9. Ишков В.В. Проблемы геохимии "малых" и токсичных элементов у вугілля України / В.В. Ишков // Наук. вісн. НГАУ. – 1999. – № 1. – С. 128–132.

#### References

- GOST 10478-93. (1993). Solid fuel. Methods for determination of arsenic. – M.: Standartinform Publ., 13 p. [In Russian].
- GOST 28974-91. (1991). Brown coals, hard coals and anthracites. Methods for determination of beryllium, boron, manganese, barium, chromium, nickel, cobalt, lead, gallium, vanadium, copper, zinc, molybdenum, yttrium and lanthanum. M.: Standartinform Publ., 8 p. [In Russian].
- GOST 9815-75. (1975). Brown coal, hard coal, anthracite and combustible shales. Method for sampling of seam samples. M.: Standartinform Publ., 6 p. [In Russian].
- Kler, V.P. (Ed.). (1982). Instruction for the study of toxic components in the exploration of coal and shale deposits. M.: Institute of the lithosphere AS USSR, 84 p. [In Russian].
- Ishkov, V.V. (2012). New data about the distribution of mercury, arsenic, beryllium and fluorine in the coal of the main minable layers of the Pavlograd-Petrovskiy geological-industrial region. *Scientific Visnyk NMAU*, 38, 19–27. [In Russian].
- Ishkov, V.V., Lozovoy, A.L. (2001). About regularity of distribution of toxic and potentially toxic elements in coal layers of Pavlograd-Petrovskiy district. *Scientific Visnyk NMAU*, 2, 57–61. [In Russian].
- Ishkov, V.V., Chernobuk, A.I., Mihalchonok, D.Ya. (2001). About distribution of beryllium, fluor, vanadium, plumbum and chrome in products and wastes of enrichment of the Dobropolskaya CCF. *Scientific Visnyk NMAU*, 4, 89–90. [In Russian].
- Ishkov, V.V., Chernobuk, A.I., Dvoretzkiy, V.V. (2001). About distribution of beryllium, fluor, vanadium, plumbum and chrome in products and wastes of enrichment of the Krasnoliman'skaya CCF. *Scientific Visnyk NMAU*, 5, 84–86. [In Russian].
- Ishkov, V.V. (1999). Geochemistry problems of "small" and toxic elements in coal of Ukraine. *Scientific Visnyk NMAU*, 1, 128–132. [In Ukrainian].

Надійшла до редколегії 13.07.17

V. Ishkov, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.  
E-mail: ish-w@yandex.ua,  
E. Koziy, Dep. Director ESCTSC  
E-mail: koziyes@nmu.org.ua  
State Higher Educational Institution "National Mining University"  
19 Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49600, Ukraine

## DISTRIBUTION OF TOXIC AND POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS IN THE COAL OF THE LAYER C<sub>7</sub><sup>H</sup> OF THE "PAVLOGRADSKAYA" MINE OF PAVLOGRADSKO-PETROPAVLOVSKIY GEOLOGICAL AND INDUSTRIAL DISTRICT

*Increasing requirements for environmental protection and influence accounting of coal-mining enterprises on the ecological situation stipulates the need for new scientifically grounded methods for forecasting the content of toxic and potentially toxic elements (TaPTE) in rock mass, mining waste and coal enrichment which is mined in mines.*

*In the article, the results of investigations of TiPTE in coal layer c<sub>7</sub><sup>H</sup> of "Pavlogradskaya" mine field of Pavlograd-Petropavlovsk geological and industrial region of Donbass are considered. The research aims to establish regularities in the distribution of TaPTE in the coal layer c<sub>7</sub><sup>H</sup>.*

*As a result of the performed studies, the content variations and average concentrations of TaPTE in the coal of the layer were established, maps of the isoconcentrate of TaPTE and maps of the regional constituent of their contents by the area were constructed. The constructed maps are the factual basis for the long-term forecast of the concentrations of TaPTE in the rock mass extracted in mines. Linear regression equations are calculated between the concentrations of toxic and potentially toxic elements and the main technological parameters.*

*These equations can be used for short-term and medium-term forecasting and controlling the contents of TaPTE in the extracted rock mass. In its turn, long-, medium- and short-term forecasts of TaPTE concentrations in extracted rock mass should serve as the basis for technological solutions aimed at reducing their content in coal mining products, products and waste coal.*

*Analysis of the result of statistical processing of geochemical information and geological and structural characteristics of the layer c<sub>7</sub><sup>H</sup> of mine field of "Pavlogradskaya" mine allowed us to establish, that the formation of the association of cobalt, nickel, vanadium, lead, chrome and manganese is associated with the enrichment of contact zones of the coal layer by these elements and is genetically due to influence of adsorption and reductive-oxidative barriers on the migration of matter during the diagenesis and catagenesis of coal-bearing series. It is proved that beryllium is the only element, mainly associated with the organic constituent of coals. The association of mercury and arsenic is due to their genetic connection with the sulfide mineralization of fractured zones of tectonic nature.*

*The main scientific importance of the results of the performed studies is the establishment of genetic causes that have a significant effect on the distribution of TaPTE in coal layer of c<sub>7</sub><sup>H</sup>.*

*Keywords: coal layer, coal height, ash, sulfur, toxic and potentially toxic elements, isoconcentrate maps, regional component maps, regression equation.*

В. Ишков, канд. геол.-минерал. наук, доц.  
E-mail: ish-w@yandex.ua,  
Е. Козий, зам. директора УНЦ ПИГ  
E-mail: koziyes@nmu.org.ua  
Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет"  
пр. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, 49600, Украина

## О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТОКСИЧНЫХ И ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УГЛЕ ПЛАСТА C<sub>7</sub><sup>H</sup> ШАХТЫ "ПАВЛОГРАДСКАЯ" ПАВЛОГРАДСКО-ПЕТРОПАВЛОВСКОГО ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

*Повышение требований к охране окружающей среды и учету влияния угледобывающих предприятий на экологическую обстановку обуславливает потребность в новых научно обоснованных методах прогноза содержания токсичных и потенциально токсичных элементов (ТиПТЭ) в добываемой шахтами горной массе, отходах добычи и углеобогащения.*

*Рассматриваются результаты исследований ТиПТЭ в угле пласта c<sub>7</sub><sup>H</sup> поля шахты "Павлоградская" Павлоградско-Петропавловского геолого-промышленного района Донбасса. Цель работы – установить закономерности в распределении ТиПТЭ в угле пласта c<sub>7</sub><sup>H</sup>.*

*В результате выполненных исследований установлены вариации содержания и средние концентрации ТиПТЭ в угле пласта, построены карты изоконцентрат ТиПТЭ и карты региональной составляющей их содержания по площади шахтопласта. Построенные карты являются фактологической основой для долгосрочного прогноза концентраций ТиПТЭ в добываемой шахтой горной массе. Рассчитаны линейные уравнения регрессии между концентрациями токсичных и потенциально токсичных элементов и основными технологическими параметрами. Эти уравнения могут быть использованы для краткосрочного и среднесрочного прогноза и контроля содержания ТиПТЭ в добываемой горной массе. В свою очередь долго-, средне- и краткосрочные прогнозы концентраций ТиПТЭ в добываемой горной массе должны служить основанием для технологических решений, направленных на снижение их содержания в продуктах угледобычи, продуктах и отходах углеобогащения.*

*Анализ результатов статистической обработки геохимической информации и геолого-структурной характеристики пласта c<sub>7</sub><sup>H</sup> поля шахты "Павлоградская" позволил установить, что формирование ассоциации кобальта, никеля, ванадия, свинца, хрома и марганца связано с обогащением этими элементами приконтактных зон угольного пласта и генетически обусловлено влиянием адсорбционного и окислительно-восстановительного барьеров на миграцию вещества в процессе диагенеза и катагенеза угленосной толщи. Доказано, что бериллий является единственным элементом, который преимущественно связан с органической составляющей углей. Ассоциация ртути и мышьяка обусловлена их генетической связью с сульфидной минерализацией трещиноватых зон тектонической природы.*

*Основное научное значение результатов выполненных исследований заключается в установлении генетических причин, оказывающих существенное влияние на особенности распределения ТиПТЭ в угле пласта c<sub>7</sub><sup>H</sup>.*

*Ключевые слова: угольный пласт, мощность, зола, сера, токсичные и потенциально токсичные элементы, карты изоконцентрат, карты региональной составляющей, уравнение регрессии.*

**ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ**

УДК 556.3 (477-04+(100)):341:061.1ЄС

О. Кошляков, д-р. геол. наук, проф., зав. каф.

E-mail: kosh57@ukr.net,

О. Диняк, канд. геол. наук, доц.

E-mail: oksdun@ukr.net,

І. Кошлякова, пров. інж.

E-mail: irkos@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна**ПРОБЛЕМИ ВИДІЛЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОДНИХ МАСИВІВ  
У МЕЖАХ ТРАНСКОРДОННИХ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ  
ВОДНОГО ЗАКОНОДАВСТВА ЄС***(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол.-мін. наук, проф. М.М. Коржневим)*

*Розглядаються стан і проблема вивчення взаємозв'язку поверхневих і підземних вод у межах транскордонних територій України з урахуванням вимог водного законодавства ЄС. Оцінка стану та управління станом транскордонних водних систем (у тому числі підземних вод) має полягати не лише в їхньому фактографічному вивченні (картографуванні на основі геоінформаційних систем), а й в ранжуванні за ступенем ризику виникнення можливих транскордонних проблем. Завдання ускладнюється також тим, що підземні води є динамічною компонентою надр, водних ресурсів і екосистем (навколишнього природного середовища), тому процес управління ними є досить складним, багатофакторним і багатоцільовим, а конкретні схеми оцінки та управління підземними водами розробляються залежно від кінцевої мети. Обґрунтовано, що при виділенні підземних водних масивів обов'язково слід урахувати існуючу гідрогеологічну стратифікацію, особливості умов вертикального і горизонтального водообміну на території.*

*Ключові слова: підземні водні масиви, транскордонні водні системи, антропогенний вплив.*

**Вступ.** Підземні води є компонентою надр, водних ресурсів і екосистем (навколишнього природного середовища), тому процес управління ними є досить складним, багатофакторним і багатоцільовим. Залежно від кінцевої мети розробляються конкретні схеми оцінки та управління підземними водами.

Зокрема, як компонента надр підземні води розглядаються як найважливіша корисна копалина, що має низьку специфічні властивості. Перш за все, це динамічність і відновлюваність запасів підземних вод. Водночас, підземні води можуть бути чинником, що ускладнює видобуток інших корисних копалин і вимагає запобіжних заходів боротьби з водопритоками до гірничих виробок. Як частина водних ресурсів підземні води враховуються у водогосподарських балансах підприємств і територій, у розрахунках меженого стоку річок, розглядаються як складова ресурсів поверхневих вод. Як компонента навколишнього середовища (екосистем) підземні води формують зволожені ландшафти в зонах розвантаження або солончаки при неглибокому заляганні рівня підземних вод. Динаміка рівнів і хімічний склад підземних вод враховуються при проектуванні будинків і споруд, при здійсненні меліоративних заходів тощо.

Вважається, що найбільш ефективне управління поверхневими і підземними водами відбувається на рівні річкового басейну (басейну стоку) – об'єкта інтегрованого управління водними ресурсами (ІУВР) [1]. Зрозуміло, що проблему збереження та оптимального використання водних ресурсів спільно розв'язують гідрогеологи, гідрологи, фахівці з водного господарства, гідротехніки, екологи, економісти. З огляду на це необхідно враховувати той факт, що басейн чи об'єкт управління може розташовуватись на території різних країн.

На всій протяжності лінії державного сухопутного кордону України (близько 5 638 км) по обидва боки від неї існують системи поверхневих і підземних вод, які за визначенням є транскордонними. Ресурси підземних вод мають величезне значення для життя населення і розвитку економіки як України, так і суміжних держав. Тому проблема створення системи управління транскордонними водними басейнами, що враховує міжнародний аспект, є нагальною та необхідною.

Для вирішення цього завдання передусім необхідно на основі аналізу гідролого-гідрогеологічних умов виділити транскордонні водні басейни, їхню поверхневу та підземну складові таким чином, щоб не виникало професійних неузгодженостей між фахівцями з різних країн, тобто однозначно визначити межі транскордонних водних систем. Також зрозуміло, що оцінка стану та управління станом транскордонних водних систем (у тому числі підземних вод) має полягати не лише в їхньому фактографічному вивченні (картографуванні), а й у ранжуванні за ступенем ризику виникнення можливих транскордонних проблем.

**Викладення основного матеріалу.** Вода – необхідний елемент життєзабезпечення населення. Від її якості залежить стан здоров'я людей, рівень їхнього санітарно-епідеміологічного благополуччя, ступінь комфортності, а отже, і соціальна стабільність суспільства. Зростання кількості населення, швидка урбанізація та індустріалізація, розвиток сільського господарства і туризму, а також зміна клімату, способу життя і звичного раціону харчування невпинно тиснуть на водні ресурси та екосистеми. Необхідно нові засоби оцінки та управління цим ресурсом з урахуванням масштабу – глобального, регіонального, локального, об'єктового.

Особливо складна ситуація виникає для транскордонних водних систем, які покривають 45 % суші у світі та поєднують дві країни або більше в частині водних ресурсів над (поверхневі води) і під (підземні води) поверхнею Землі [8]. Більше половини населення світу щодня залежить від водних ресурсів, які спільно використовуються більше ніж однією країною. Це поверхневі води транскордонних річок і озер, а також підземні води, що містяться у водоносних горизонтах і комплексах, поширених на території кількох країн. Оскільки потреба в цьому дорогоцінному ресурсі продовжує зростати, питання про необхідність співпраці між країнами для ефективного управління водними ресурсами стоїть доволі гостро.

З точки зору міжнародного права транскордонне співробітництво закріплено в міжнародному праві та в Статуті ООН. Так, Конвенція про охорону та використання транскордонних водотоків і міжнародних озер (Конвенція по транскордонним водам) була прийнята в м. Гельсінкі,

Фінляндія, у 1992 р. і набула чинності в 1996 р. Вона виступає як механізм зміцнення національних заходів і міжнародного співробітництва з екологічно обґрунтованого управління транскордонними поверхневими і підземними водами, включаючи їхню охорону. Станом на 31 жовтня 2013 р., у Конвенції по транскордонних водах беруть участь 39 країн з регіону Європейської економічної комісії (ЄЕК) ООН. Передбачається, що Конвенція досягне більш широкої участі завдяки глобальному відкриттю для всіх держав-членів ООН.

Водна рамкова директива Європейського Союзу (Директива 2000/60/ЕС або ВРД) також надає платформу для управління транскордонними водними ресурсами і стимулює країни одного басейну до діалогу і формування басейнної політики. Підхід ВРД заснований на класифікації й звітності по басейнах, включаючи характеристики вихідного стану, тисків і вплив, комплексне управління на національному та міжнародному рівні, визначення цілей управління і жорсткі терміни їхнього досягнення, розробку басейнових планів і програм заходів, використання інформаційних систем, звітність і моніторинг, економічний підхід, участь широкої громадськості і т.ін.

На сьогодні в Україні відбувається процес реформування системи управління водними ресурсами згідно з вимогами ВРД з урахуванням існуючого міжнародного досвіду [1]. Згідно з ВРД установлюються рамкові вимоги щодо захисту всіх видів природних вод, включаючи підземні. Вона вимагає ідентифікації "підземних водних масивів" (ПЗВМ) як невід'ємної складової частини басейнів природних вод. Відповідно до ст. 2.12 ВРД "підземний водний масив – це чітко позначений обсяг підземних вод у рамках певного водоносного горизонту або горизонтів". Транскордонний поверхневий або підземний водний масив – це такий масив, що поширюється по обидва боки від кордону держав.

Визначальною проблемою, що виникає при виділенні підземних водних масивів, є термінологічна неузгодженість між базовими поняттями ВРД і традиційними вітчизняними гідрологічними і гідрогеологічними визначеннями.

Наприклад, поняття "підземний водний масив" у ВРД не узгоджується з традиційним гідрогеологічним розумінням цього терміна (у гідрогеології гідрогеологічний масив визначається як структура, в якій кристалічний фундамент виходить на поверхню або розташований під малопотужним покривом четвертинних відкладів, а серед підземних вод переважають води тріщинно-жильного типу). З гідрологічних позицій поверхневі води частково формуються в результаті руху атмосферних опадів крізь гірські породи (підземного стоку). З гідрогеологічних позицій підземний стік у річки є елементом розвантаження підземних вод, складовою загального підземного стоку та проявом (показником) вільного (інтенсивного) водообміну між підземними і поверхневими водами. Він забезпечується інфільтрацією атмосферних опадів, а також низхідним перетіканням через водотриви на значних водозбірних площах і реалізується у вигляді виходів джерел і розвантаження в балки (височування на схилах) і русла річок. Загальний поверхневий стік при цьому формується за рахунок розвантаження ґрунтових, підземних вод і площинного схилового і підґрунтового стоку (верховодки). Залежно від зміни природних умов окремих районів закономірно змінюються величина та режим підземного стоку в річки. Тому підземний стік є одним з основних критеріїв водного режиму на території масиву поверхневих вод (басейну річки або його частини) [3]. Дренування підземних вод річками відбувається також при висхідному русі підземних вод не лише

в межах руслової ерозії та глибини залягання перших водотривів, а й нижче них, особливо, якщо відсутні регіональні водотриви. Отже, підземні води є важливою складовою річкового стоку, перш за все в меженних умовах. Одночасно вони являють собою природний ресурс, що все частіше використовується для водопостачання.

Слід звернути увагу, що сьогодні в густонаселених районах України з інтенсивною господарською діяльністю, де функціонують великі підземні водозабори, значний відбір обумовлює перетікання підземних вод із суміжних водоносних шарів та інтенсифікацію залучення поверхневих вод до живлення підземних, а це відбивається на якості останніх. З іншого боку, поверхневі водні масиви виявляються під негативним впливом з боку підземних у випадку, коли малий річковий стік ще більше зменшується за рахунок відбору підземних вод. У свою чергу підйом рівня підземних вод, наприклад, у зв'язку з їхнім штучним або антропогенним поповненням, також може становити загрозу поверхневим водним масивам [3].

Наприклад, постачання населення м. Києва питною водою здійснюється як за рахунок поверхневих, так і підземних вод (два поверхневі водозабори, а саме Дніпровський та Деснянський, сеноман-келовейський водоносний комплекс і байоський водоносний горизонт). Вважається, що формування основних ресурсів вод (як поверхневих, так і підземних) для забезпечення міста відбувається в долині Верхнього Дніпра. Дніпро – третя за величиною річка Європи, а також друга за величиною річка басейну Чорного моря. Басейн річки Дніпро є трансграничною системою: 20 % площі річкового басейну розташований в межах території Російської Федерації, 23 % на території Республіки Білорусь і 57 % у межах території України. За кількісним водозабезпеченням басейн верхнього Дніпра (з урахуванням р. Прип'ять) має порівняно сприятливі умови, тобто кількість водних ресурсів можна вважати достатньою для сучасних і перспективних потреб у воді. Інше питання щодо якості. Водозбірний басейн у межах Білорусії становить 56,5 % території країни, з урахуванням басейну р. Прип'ять, яка впадає в Дніпро вже на території України. Басейн Верхнього Дніпра на території України (з точки зору формування запасів для водозабезпечення м. Києва) розташований в Північній частині України і обмежений державним кордоном України та створом Канівської ГЕС. Для цієї території характерними є значна штучна зарегульованість поверхневого стоку та характерна наявність різного роду урбаністичних систем, тобто територія зазнає значного антропогенного впливу, що потенційно впливає на якість води [8].

Нині на території верхнього Дніпра відповідно до вимог ВРД умовно виділено чотири масиви підземних вод, а саме: алювіальні та алювіально-делювіальні голоценові водоносні об'єкти в долинах і на терасах річок; флювіогляціальні, лімногляціальні й гляціальні водоносні об'єкти; неоген-палеогеновий масив; крейдяний масив. Останній масив відповідає сеноман-келовейському водоносному комплексу і, як згадувалось, є джерелом питного водопостачання м. Києва. За даними оцінки трансграничних річок, озер і підземних вод Європейської економічної комісії [8], неоген-палеогеновий масив є трансграничним з напрямком руху потоку в бік території України (рис. 1). На території Білорусії характерним є дренування річками не лише четвертинних водоносних горизонтів, а й крейдяних та юрських, місцями також тріщинних вод Українського кристалічного масиву. Тому масив підземних вод, що відповідає сеноман-келовейському водоносному комплексу, розрішенні питань водопостачання м. Києва доцільно розглядати як трансграничний.



Рис 1. Напрямок підземного стоку для території верхнього Дніпра [8]:

- (1, 2 – артезійські басейни та їхні межі відповідно до гідрогеологічного районування;  
 3 – геоструктурна вододільна межа між артезійськими басейнами західної частини Східноєвропейської платформи;  
 4 – орографічний вододіл між басейнами чорного та балтійського морів; 5 – напрямок току)

Власне в межах території м. Києва внаслідок багаторічної експлуатації питних підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу у структурі водообміну відбулися суттєві зміни [2]. У долинах річок у районах розташування водозабірних свердловин зафіксована найбільш значна інверсія потоку: зони природної висхідної фільтрації перетворилися місцями в ділянки активної низхідної фільтрації і, відповідно, додаткового живлення сеноман-келовейського водоносного комплексу. На ділянках інтенсивного інверсійного живлення в зонах впливу водозаборів темп водообміну зріс у 6–10 разів. Також суттєво змінилася структура латеральної фільтрації. Фактично підземні водозабори перетворилися у головні дренажні системи водоносного комплексу, а ті ділянки в долинах річок, які не охоплені п'єзометричними воронками, на сьогодні являють собою лише додаткові зони розвантаження.

Авторами статті також досліджувався стан підземних вод території м. Києва із застосуванням сучасних геоінформаційних технологій. Зокрема, аналізувались дані режимних спостережень за рівнем ґрунтових вод [4], вивчались зміни хімічного складу питних підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу за весь тривалий час його експлуатації [5, 7], а також можливість застосування при цьому геоінформаційних систем і математичного гідрогеологічного моделювання [6]. При виконанні дослідження були застосовані, крім балансового та гідродинамічного методу, аналітичне визначення активності тритію в зразках проб води із сеноман-келовейського водоносного комплексу та обробка отриманих ізотопно-радіогеохімічних даних [7]. Узагальнюючи наявну інформацію, можна зробити висновок: у межах території м. Києва зміни хімічного складу питних підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу є нерівномірними за площею і пояснюються передусім їхньою експлуатацією. Останнє спричинило суттєві порушення у співвідношеннях гідродинамічних напорів між суміжними водоносними шарами та інтенсифікацію низхідного руху в зоні активного водообміну. Результати

орієнтовних балансових розрахунків інтенсивності водообміну в системі підземних вод території м. Києва, які виконані авторами, свідчать, що на теперішній час частка атмосферних опадів і техногенних втрат у формуванні ресурсів сеноман-келовейського водоносного комплексу дорівнює приблизно 21 %, а час надходження поверхневих вод до згаданого комплексу становить близько 12 років. Це об'єктивно підтверджується результатами розрахунків за вмістом тритію в підземних і поверхневих водах: відсоток надходження поверхневих вод до сеноман-келовейського водоносного комплексу дорівнює 23, а час надходження – приблизно 10,4 роки.

**Висновки.** Водна рамкова директива Європейського Союзу (ВРД) надає лише платформу для управління транскордонними водними ресурсами і стимулює країни одного басейну до діалогу і формування басейнової політики. Підхід ВРД заснований на класифікації й звітності по басейнах, включаючи характеристики вихідного стану, тисків і впливу, на комплексному управлінні на національному та міжнародному рівнях, визначенні цілей управління і чітких термінів їхнього досягнення, розробці басейнових планів і програм заходів, використанні геоінформаційних систем, звітності, економічному підході, участі широкої громадськості і т.ін.

При визначенні та обґрунтуванні меж підземних водних масивів транскордонних територій України, організації оптимальної мережі моніторингу та аналізі результатів моніторингових спостережень виникає низка взаємопов'язаних актуальних адміністративно-правових і наукових питань, що вимагають вирішення чи, принаймні, урахування.

По-перше, українською необхідно вирішити питання термінологічної неузгодженості між базовими поняттями ВРД і традиційними вітчизняними гідрологічними і гідрогеологічними визначеннями.

По-друге, межі поверхневих і підземних водних масивів зазвичай не збігаються. Це обумовлено особливостями живлення, руху та розвантаження природних вод, що визначаються геологічними та фізико-географічними

умовами конкретної території, а також рівнем її антропогенного навантаження. До того ж межі підземних водних масивів, розташованих по вертикалі один над одним, зазвичай латерально також не збігаються.

По-третє, межі водних масивів не є статичними, тобто з часом вони змінюються. Причини змін можуть бути природними (напр., зміна кліматичних умов) та антропогенними (техногенні зміни рельєфу денної поверхні, зміни гіпсометричних рівнів у підземних водних масивах унаслідок відбору води тощо). Дуже важливо, що йдеться про зміни меж не в геологічному, а в реальному часі, тобто протягом десятків років.

По-четверте, при виділенні підземних водних масивів обов'язково враховується існуюча гідрогеологічна стратифікація, особливості умов вертикального і горизонтального водообміну на території. Як відомо, водообмін у гідрогеологічних структурах на території України та сусідніх держав має переважно не природний, а природно-техногенний характер, що також у реальному часі може змінювати розташування меж виділених транскордонних масивів підземних вод.

По-п'яте, з урахуванням існуючого природно-техногенного кругообігу води взаємний вплив поверхневих і підземних водних масивів може виявлятися на значному віддаленні їх один від одного, тобто в тому випадку, коли вони не є транскордонними за визначенням.

#### Список використаних джерел

1. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення: вид. офіційне. – К. : Твій формат, 2006. – 240 с.
2. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в нарушенных условиях / В.М. Шестопалов, Н.С. Огняник, Н.И. Дробноход и др. – К. : Наук. думка, 1991. – 528 с.
3. Кошляков О. Виснаження та забруднення питних водноносних горизонтів в умовах інтенсивної експлуатації на території м. Києва / О. Кошляков, О. Диняк, І. Кошлякова // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2012. – № 56. – С. 38–42.
4. Кошляков О.Є. Аналіз даних режимних спостережень за рівнем ґрунтових вод у м. Києві [Електронний ресурс] / О.Є. Кошляков, О.В. Диняк, І.С. Кошлякова // Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти : матер. XI Міжнар. конф. – К., 2012. – Електрон. опт. диск (CD-ROM).

O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), Prof., Head of the Department

E-mail: kosh57@ukr.net,

O. Dyniak, Cand. Sci. (Geo), Assoc. prof.

E-mail: oksdyn@ukr.net,

I. Koshliakova, Leading engineer

E-mail: irkos@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv

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

## PROBLEMS OF DETERMINATION OF GROUNDWATER BODY AT CROSS-BORDER REGIONS OF UKRAINE ACCORDING TO EU WATER LEGISLATION

*The article considers the problems with the interconnection between surface water and groundwater in cross-border regions of Ukraine according to EU water legislation. It is also clear that cross-border water systems (including groundwater) should be estimated not only factographically (digital mapping based on geoinformational systems), but must also be ranked by the degree of possible cross-border problems occurrence risks. Also the problem is complicated by the fact that groundwater is a dynamic component of subsoil, water resources and ecosystems (environment), so groundwater management is very complex, multidimensional and multi-purpose, and specific assessing and managing groundwater schemes are developed based on the ultimate goal. When selecting groundwater arrays, existing hydrogeological stratification and specificities of vertical and horizontal water exchange conditions in the area must be taken into account.*

**Keywords:** body of groundwater, cross-border water systems, anthropogenic impact.

A. Кошляков, д-р геол. наук., проф., зав. каф.

E-mail: kosh57@ukr.net,

О. Диняк, канд. геол. наук., доц.

E-mail: oksdyn@ukr.net,

И. Кошлякова, вед. инж.

E-mail: irkos@ukr.net

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

## ПРОБЛЕМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОДНЫХ МАССИВОВ В ПРЕДЕЛАХ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ТЕРРИТОРИЙ УКРАИНЫ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ВОДНОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА ЕС

*Рассматриваются состояние и проблема изучения взаимосвязи поверхностных и подземных вод в пределах трансграничных территорий Украины с учетом требований водного законодательства ЕС. Оценка состояния и управления состоянием трансграничных водных систем (в том числе подземных вод) должна заключаться не только в их фактографическом изучении (картографировании на основе геоинформационных систем), но и в ранжировании по степени риска возникновения возможных трансграничных проблем. Задача осложняется также тем, что подземные воды являются динамичной компонентой недр, водных ресурсов и экосистем (окружающей среды), поэтому процесс управления ими является достаточно сложным, многофакторным и многоцелевым, а конкретные схемы оценки и управления подземными водами разрабатываются в зависимости от конечной цели. Обосновано, что при выделении подземных водных массивов обязательно следует учитывать существующую гидрогеологическую стратификацию, особенности условий вертикального и горизонтального водообмена на территории.*

**Ключевые слова:** подземные водные массивы, трансграничные водные системы, антропогенное воздействие.

5. Кошляков О.Є. Виявлення динаміки змін хімічного складу підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу в м. Київ за допомогою методів математичної статистики / О.Є. Кошляков, Т.О. Кошлякова // Наук. вісн. Нац. гірнич. ун-ту. – 2014. – № 3(141). – С. 5–10.

6. Кошляков О.Є. Забезпечення інформаційної складової гідрогеологічних процесів м. Києва засобами ГІС [Електронний ресурс] / О.Є. Кошляков, О.В. Диняк, І.С. Кошлякова // Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти : матер. XIV Міжнар. конф. – К., 2015. – Електрон. опт. диск (CD-ROM).

7. Оцінка інтенсивності водообміну в сеноман-келовейському водоносному комплексі на території м. Києві в умовах техногенного впливу / Т. Кошлякова, О. Кошляков, В. Долін, В. Скрипкін // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2015. – № 68. – С. 66–70.

8. Second Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters / Economic commission for Europe Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes 2011. – Режим доступу: <https://www.unece.org/?id=26343>

#### References

1. EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Definitions of Main Terms. (2006). Kyiv : Tviy format, 240 p.
2. Shestopalov, V.M., Ognyanik, N.S., Drobnohod, N.I. et al. (1991). Water cycle in hydrogeological structures of Ukraine: Water cycle in disturbed conditions. Kyiv : Naukova dumka, 528 p. [In Russian].
3. Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I. (2012). Depletion and contamination of drinking water aquifers under intensive exploitation on the territory of Kyiv. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (56), 38–42. [In Ukrainian].
4. Koshlyakov, O.Y., Dyniak, O.V., Koshlyakova, I.Y. (2012). Analysis of the data of regime observations of groundwater levels in Kiev. *Abstract of XI the International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, Kiev 2012*. [In Ukrainian].
5. Koshliakov, O. Y., Koshliakova, T.O. (2014). Study of senoman-kelovey ground water complex chemical composition change dynamics within the confines of the city of Kyiv by mathematical statistics methods. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (141), 5–10. [In Ukrainian].
6. Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I. (2015). Providing the information component of hydrogeological processes using GIS in Kiev. *Abstract of XIVth International Conference – Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, Kiev 2015*. [In Ukrainian].
7. Koshliakova, T., Koshliakov, O., Dolin, V., Skrypkin, V. (2015). Man-made impact and water cycle rates in cenomanian-calloviaian groundwater complex (Kyiv). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(68), 66–70. [In Ukrainian].
8. Second Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters. Economic commission for Europe Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes 2011. URL: <https://www.unece.org/?id=26343>

Надійшла до редколегії 01.11.17

## ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 55.528.8

V. Zatserkovnyi, Dr. Sci. (Tech.), Assoc. prof.  
 Head of the Geoinformatics Department  
 E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com,  
 I. Tishaiev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. prof.  
 E-mail: ivantishaev@gmail.com  
 Taras Shevchenko National University of Kyiv  
 Institute of Geology, 90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

### ANALYSIS OF "HEAT ISLANDS" MONITORING PRINCIPLES

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

*The phenomenon of urban heat island and methods of its examination are studied in this work. The urban heat island (CHI) is determined by positive temperature anomaly located between build-up area and its surrounding. For detailed analysis of heat island of specific territory different methods can be used. Today there are 3 research methods that are often used: transformational, with help of observation network and remote sensing materials. The most promising is a method of analysis and de-coding of satellite data. The target of the work is analysis of temperature anomalies within the borders of Kyiv city with the help of remote sensing data (satellite data of Landsat missions). In this research initial materials were space images of satellites Landsat 7, Landsat 8. The build-up part of Kyiv territory is characterized by essential thermal anomalies. The last ones might be subject to long heating period during which certain thermodynamic regime was established: heat that comes through underground pipelines is dispersed by buildings and this is reflected on the temperatures map. With almost identical meteo-conditions of remote sensing data acquisition (but during different seasons and with different duration of heating season) it becomes possible to do quantitative evaluation of thermal anomaly that appears over the city. Introduction of additional data (such as information about weather-conditions, land use / land cover classification, results of radio-location studies, investigations of atmospheric phenomena and processes) will allow to develop unified and special methodologies designed both for thermal pollution control and for increase of energy efficiency of thermal networks and infrastructure of inhabited areas. Existing system of heat island monitoring does not provide conduction of systematic inspections of the territories in order to find temperature anomalies that may negatively impact ecology of urban environment and population health.*

**Keywords:** urban heat island, microclimate, temperature anomalies, thermal field, urban/housing density.

**Introduction.** Today the Earth population is around 7,5 billion people. Herewith according to UNO more than a half of population is located in cities and according to forecast it's quantity will increase up to 66 % till 2050 [16]. The processes of growing urbanization are happening in Ukraine as well despite of decline in total population quantity (170K for 2016). According to State Statistics Committee the city population part accounts for 29 mln 584 thousand people (69,19 %) as of 1st of January 2016 and it continues to increase.

The growing urbanization and intensive expansion of cities infrastructure causes disruption of ecological balance, which threatens comfortable population habitation, causes powerful anthropogenic impact on all ecosystems components, leads to appearance of heat pollution – "heat island" (Eng. Urban Heat Island – UHI) [9, 12, 15] which are the results of accumulation of microclimate changes connected with anthropogenic transformation of urban territories.

Heat pollution is a serious problem, directly influencing ecological, geological environment and indirectly is impacting the relief. The powerful abnormal temperature fields appear around the construction which generate thermal processes. First of all, it relates to different thermal batteries, chimney pipes, heat networks and other constructions of TPP (thermal power plant) and enterprises technological cycles of which may cause surface overheating up to 50 °C and sometimes up to 80–100 °C. According to scientists' estimations the temperature of the solid and subsoil waters might exceed by 10–15 °C within the limits of certain areas.

Maximum temperatures are observed on the areas of metropolitan constrictions, in the zones where cooling systems with water-exchange are functioning, on the territories of laying out the heat pipelines and gas pipelines. There are quite intensive soils warming up, especially their lower horizons that are observed over heat- and gas pipelines. At a depth of 0,5 meters during summer time the soils temperature may go up to 40 °C and higher.

Long lasting action of heat sources breaks down the temperature regime of lithospheric space at the depth of 30–40 meters (sometimes more) increasing (or decreasing during artificial freezing of soils) temperature of rock

formations and subsoil waters, which in its turn changes physicochemical, physicochemical characteristics of the soils. First of all, the soils drying-out, breakage of structural links in them and weakening of power takes place. Such ecological changes lead to faster damage of machines and buildings designed for work in the conditions of normal temperature of geological environment, to issues from drainage structures (water pipelines, heating plants, canalizations) and often even to fall and subsidence of surface over these constructions, which at the end may create ecological problems in the city.

As researches prove [11] in the metropolises e.g. in New York the temperature on the surface of city environment is +17 °C more than temperature in the suburbs which negatively impacts the health of population. Especially threatening are zones of temperature anomalies during summer period when temperature can additionally grow. On the other hand, the increase of temperature in metropolises causes additional energy expenditures for climate-control systems, speeds up insects reproduction, metals corrosion, stimulates release of eco-toxicants in the results of chemical reactions.

The above stated proves that researches addressed to evaluate temperature rises, parrying risk of overheating of city surface territories, growth of energy expenditures, monitoring of atmosphere air are very essential.

For monitoring of "heat islands" the following methods of investigations are used: infra-red cameras, with the help of observations network and space images in infra-red band [3, 5–7, 8, 10, 13].

**Object of investigation** – the surface of Kyiv city environment where there are heat contrast objects.

**The target of the work** – analysis of temperature anomalies in the boards of Kyiv city according to data of infra-red measuring and with the help of remote sensing data (satellite data of Landsat missions) with further determination of ecologic-problem districts and areas of Kyiv city environment with the help of geo-information technologies.

**Tasks of investigation** – analysis of the reasons of temperature anomalies and development of recommendations to decrease these anomalies, setting the

maps of temperature anomalies of surface according to satellite data of thermal field.

**Analysis of latest researches.** The following authors dedicated their surveys to investigation of city heat islands with the help of thermal-vision systems – by V. Bozhenko, V. Shklyarskyi, F. Sizov, V. Zabudskyi, O. Holenkov, S. Kravchenko, B. Kornienko, the others with have done it with the help of materials of thermal space shooting – V. Hornyi, A. Tronin, B. Shylin, Y. Baldin, M. Hryshchenko,

I. Labutina, V. Lyalka, S. Stankevich, V. Filipovych, A. Krylova, B. Busyhina, I. Harkusha. In the works of these authors there were the topics of thermal GPS survey application examined during investigation of energy efficiency of city infrastructure and ecological condition of big cities.

**The summary of the main part.** Modern cities create "heat islands" – territories inside cities which are remarkable by increased temperatures of air, soils, water in comparison to city suburbs (Fig. 1).

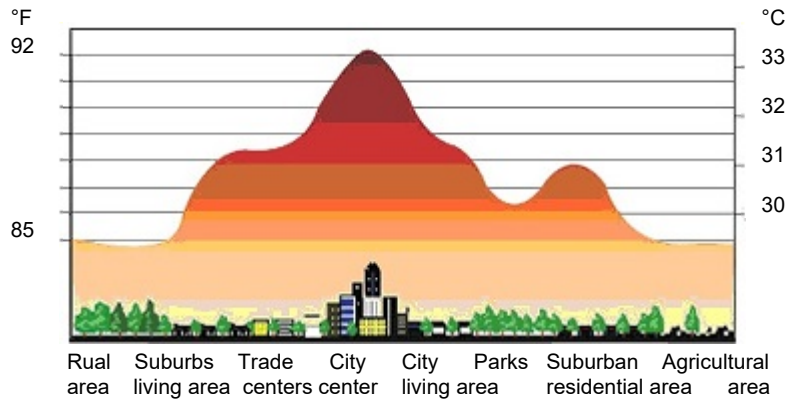


Fig. 1. Creation of "heat islands" and temperature distribution after noon

Appearance of "heat island" is caused by several factors.

1. Factor 1 – Intensive city area construction and "sealing" of the surface of ground coating with tight moisture-permeable road coatings (asphalt, cement slabs, gravel, etc.), the reduction of areas with open soil and greenery. Tight materials used in construction activities accumulate thermal energy and create moisture non-penetrating underlying surface, while configuration of construction provides higher absorption of solar radiation. As a result roofs and walls of buildings, paving and asphalt coating, other elements of city buildings absorbing solar radiation during the day become hotter unlike soil and greenery and give away warmth to air mainly in the evening. As a result, the air temperature in cities is by 70–80 % higher than the temperature in the countryside. And this difference increases with growth of metropolises construction.

Precipitations that fall on roofs, sidewalks, roads often go to the artificial drainage systems. It also causes distortion of the natural processes because of a small evaporation and low humidity and increases upward flow of actual heat in the structure of the radiation balance surface under anthropogenic infrastructure. If rural solar energy is spent on evaporation dew, transpiration, etc. in the morning, in the city and especially large one it is directly absorbed by buildings. Besides due to city territory that is heated more than the surrounding area and is characterized by a greater roughness, convection over the city increases and creates more clouds, which in turn causes a reduction in the number of hours of sunshine and the number of clear days. There is also an increase in rainfall over the city.

2. Factor 2 – Atmospheric pollution from industrial facilities sphere, transport and other sources. Any city is a concentration of industrial, energy, transport, polluting the air with various impurities, particles, smoke, gases and aerosols. A lot of different pollen and gaseous contaminants go to the atmosphere. The high concentration of pollutants in the city atmosphere especially on large the roads, streets with heavy traffic and industrial facilities leads to degradation of ecological conditions and comfortable living of urban population.

With a stable stratification of the atmosphere especially at temperature inversion, the smoke will be accumulated in

atmospheric boundary layer in such quantities that will cause negative physiological effect and sometimes mass poisoning. There are examples of the harmful impact of smoky air in the metropolises with the assistance of territory relief to it, such as when industrial waste – poisonous fumes and gases sometimes accumulate in the lower atmosphere.

City streets systems and squares lead to the changes of air directions in the cities. Air is mainly directed along the streets. Generally, the air speed is decreased while on narrow streets and crosses it increases causing dust whirlwinds and storms.

Air pollution influences radiation relocation and increases generation of condensation nuclei which causes creation of cloud droplets. Simultaneously diffuse sky radiation growth is happening which together with anthropogenic heat emission leads to appearance of local "greenhouse effect".

3. Factor 3 – Energy dissipation which is worked out and goes for heat input needs, transport service and technological processes in environment and soils that cause its heating. Among biggest anthropogenic sources of heat pollution of surrounding areas there following objects should be pointed out – heat power engineering and heat input facilities, steel industry, transport, enterprises where heated water or heated air, steaming or cooling towers are used as well. Such emissions from steel industry enterprises are have a temperature of 30–400 °C, and sometimes about 800 °C. In some industrial areas the concentration of thermal energy due to industry has increased significantly; over the industrial centers where thermal anomalies are a few degrees higher than norm hot halos appear and they are well determined on satellite images of the earth's surface.

4. Factor 4 – Formation of dead air zones that appear on the constructed areas and which prevent turbulent mixing of the atmospheric layer and the removal of excessive heat in the atmosphere layers lying above, unlike undeveloped areas;

5. Factor 5 – Specifics of relief. In conditions of complex relief various local air circulations impact the development of "heat island".

6. Factor 6 – Changes of natural hydrological cycles of rivers and reservoirs which flow though cities or near cities, draining of wetlands within city boundaries as well.



A large contribution to the appearance of "heat islands" does heat power engineering. The heat emissions are one of the major factor in the interaction of heat and power facilities with the environment, including the interaction with atmosphere and hydrosphere. Heat emission occurs at all stages of chemical energy conversion of organic substance or nuclear fuel for further generation of thermal energy. Big part of the heat received by cooled water in the condensers of steam turbines is transmitted to the cooling buildings, ponds, drains and from there into the atmosphere. The temperature in place of heated water discharge rises which leads to increase of average surface of water bodies, and therefore the atmosphere air temperature over the heat power plant increases due to energy emitted by this plant into the atmosphere.

Electric power plants can raise the water temperature compared to the surrounding area by 5–15 °C. If the temperature in the water basin is 16 °C the temperature of wastewater on station will be from 22 to 28 °C. In summer period it may even reach 30–36 °C.

Increase of water temperature is able to break the structure of water basic flora. Peculiar to cold water flora are changed for heat-loving plants and with a time because of high temperatures are pushed out at all.

**The research of "heat islands" with the help of thermos-vision cameras.** Among modern instruments of investigation of city infrastructure objects conditions the major role play techniques of thermal monitoring which provide visualization of thermal condition of the object thanks to transformation of infrared rays into electric signal which is further used for analysis of condition of subject under research which gives a possibility to solve the tasks of remote and non-contact control in non-reachable infrared (IR) range of radiation spectrum for human vision.

Thermovisor or infra-red camera – is a device for image acquisition in infra-red range of wave-length. Exactly in this

range there is a maximum emissivity capacity of bodies which have regular for us temperatures (-20 ... +40 °C). With the help of thermovisor it's possible to immediately measure heat flow from tens of thousands of object points or in other words to receive it's temperature field (thermograph).

Thermographs are the basic for analysis of received information about object's thermal state.

Thermovisors are used for military targets, energy audit, evaluation of building structures quality, detection hidden defects of construction, disorder of heat insulation of shielding constructions, because of mistakes of engineering and construction, violation of manufacturing technologies of construction materials, mistakes and violations of technologies during building constructing, while seeking for heat leakage of heat pipelines and for diagnostics of electric equipment.

Any objects emit heat and during thermos-vision inspection with the help of thermos-vision camera the operator gets so called thermal images of objects (Fig. 2) which reflect the distribution of temperatures and the heating of their surfaces. The thermos-vision camera shooting is usually performed in case of inside and outside temperature difference not less than 10–15 °C. The most exact data is received in process of procedure execution during cold months of autumn, spring and winter.

Analysis of received thermographs allows to determine various defects that happened during construction. As an example in the Fig. 3 there some common defects of buildings and structures that are found with the help of thermal control method.

Shooting with the help of thermovisor indicates the "painful" points of the building. On thermograph they are shown with bright yellow shine. The higher shine the more heat is emitted by the building.



Fig. 2. Getting thermal image of objects with the help of thermovisors

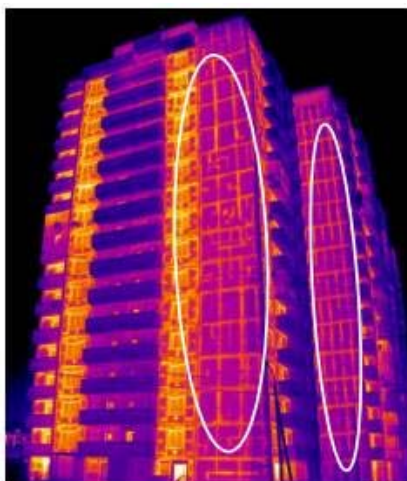


Fig. 3. Common defects of buildings and structures that are found with the help of thermal control method [5]

**Investigation of "heat island" with the help of Earth Remote Sensing (ERS).** Materials of ERS in infra-red range opened wide opportunities to solve many tasks of the industry, namely in military reconnaissance, meteorology, tectonics, oceanology, to look for minerals, monitor environment, for energy-economy, cartography of Earth thermal fields, determination of sea surface temperature, monitoring of natural disasters (seismic activities, volcano eruptions, monitoring of forest fires as well), to observe in time and space their development, to see specifics of space distribution of "heat islands", to evaluate heating effect of various city objects one on the other.

In modern thermal infra-red images one can find reflections of Earth surface objects hidden on these images in other ranges of spectrum and invisible for human vision. Thermal images deliver as well other important information which is displayed in relative contrasts of brightness of the sounding objects with different temperature.

Modern satellite sensors (of civil use) allow to receive special resolution on the level of tens hundreds meters on 1

pixel: 90 m (Aster), 60 m (Landsat 7), 100 m (Landsat 8). Such images contain quality-new information about landscapes of underlying surface and its geographical characteristics.

In this research initial materials were space images of satellites Landsat 7, Landsat 8. Images from Landsat satellites are one of the most common materials of Earth remote sounding in researches on regional level. This also concerns images in thermal infra-red range. Such images allow to see inner space structure of city heat islands, trace development in time and space of local thermal anomalies, evaluate thermal impact of various city objects one on the other. In researches of city heat islands images from Landsat satellites are used both as main and additional material.

As an example on the Fig. 4 there is an intensity of thermal emission presented (on wave-length 11,45 micrometers) within Kyiv city territory and adjacent agglomeration. Image was received with the help of spectroradiometer ETM+ (satellite Landsat 7) 28/03/2003.



Fig. 4. Image of Kyiv city territory in thermal infra-red range

For investigation of special peculiarities of heat islands one uses various types of classifications according to space images in thermal IR range. As a rule, such methods are used for examination of "lands use" and creation of "maps of land covers" (land cover/ land use). Often images in different spectrum ranges are used in land cover/ land use researches, one of them is thermal range. During analysis of links between types "land use" and thermal anomalies land cover/ land use maps are developed. It is not one time mentioned that there is an interconnection between heat island structure and characteristics of lands surface (land cover/land use), as well as the opportunity to use thermal images as a trusted source of information for getting information about lands use specifics.

Important part of scientific works with the topic of special peculiarities of heat island examination are occupied by various types of thermal characteristics surface modelling and exclusion of thermal emission parameters. Most often the task of getting thermal images of land surface temperatures is investigated (LST). LST figure is possible to get while using the equipment that executes shooting immediately in several thermal channels (algorithm of "split window method, SWM).

As well it is important to take into account space-time dynamics of heat islands both seasonal and daily. Examination of daily dynamics allows quite fully to evaluate thermal characteristics of various city objects, change of its temperature amplitude during a day, define objects which formulate thermal anomalies in different time of a day, define time of a day which best suits for thermal shooting with this or that aim. Nevertheless, during use of thermal images from Landsat satellite it is difficult to illustrate daily change of heat island with the help of space images because of specifics of satellites' orbit (orbit is solar-synchronous and thus satellite goes over certain place at the same time of a day). Night images from Landsat satellites are in archives but there are not so many of them. The investigation of seasonal dynamics allows to reveal heat island change of structure during a year, local thermal anomalies specifics dynamics, thermal characteristics of anthropogenic and natural objects in the scale of the whole year.

Important role should be dedicated to comprehensive researches in which it is necessary to combine LST images creation, examination of seasonal and daily dynamics in cities with different climate conditions, statistical analysis, links between LST, NDVI images and land cover/ land use

maps, investigation of thermal flows. Such types of researches give multisided evaluation of heat islands and are able to make essential contribution to city climate urbanization impact study.

Summarizing short overview of approaches of urbanized territories investigations on the basics of thermal images it is important to mark that today the most common is an approach first of all based on modelling and recovering parameters of underlying surface, and less examination of geographical specifics of the temperature field (and its changes) of anthropogenic and natural objects.

Let's study as an illustration the territory of Kyiv city (within borders indicated on Fig. 4). Let's create RGB-composite in natural colors (NCC – Natural Color Composite) according to a set of multi-spectrum data LE71810252003087ASN00 received by spectroradiometer ETM+ (Landsat 7 satellite) on 28/03/2003 (Fig. 5). On the image it is clearly shown types of land covers as well as the regimes of their use are identified.

On Fig. 6 it is presented brightness temperature of the surface proportional to energy of thermal emission of land-based objects.



Fig. 5. Kyiv city territory and its adjacent agglomerations valid as of 28/03/2003

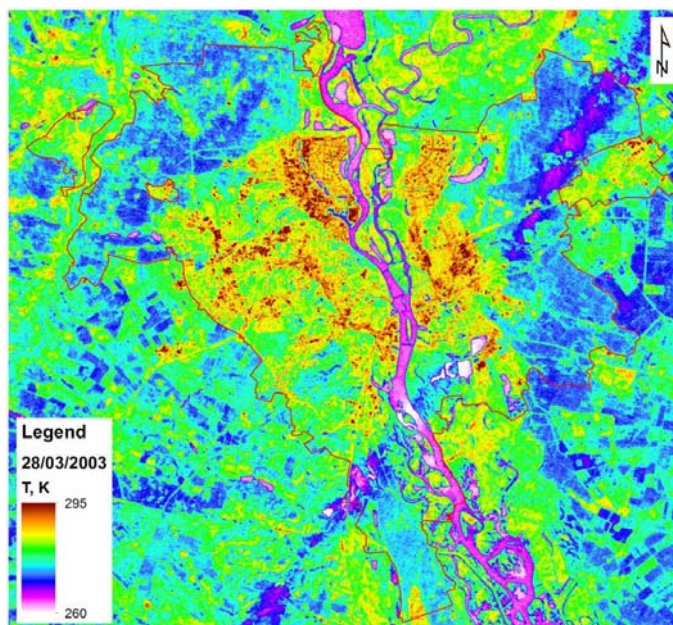


Fig. 6. Brightness temperature of the surface valid as of 28<sup>th</sup> of March (end of heating season).  
LE71810252003087ASN00

As clearly seen on Fig. 6 build-up part of Kyiv territory is characterized by essential thermal anomalies. The last ones might be subject to long heating period during which certain thermo-dynamic regime was established: heat that comes through underground pipelines is dispersed by buildings and this is reflected on the temperatures map. Separately it's worth mentioning such a detail of this image – along the whole scene from northern east to southern west there is a line of

low temperatures. This is inversion trace from jet engine airplane which is gradually dispersing in the atmosphere and has no relation to land surface temperatures.

On Fig. 7 for comparison the situation at the beginning of heating season is shown (the year is different, 2014, but this is not crucial as the beginning and the end of heating season each year is not changing).

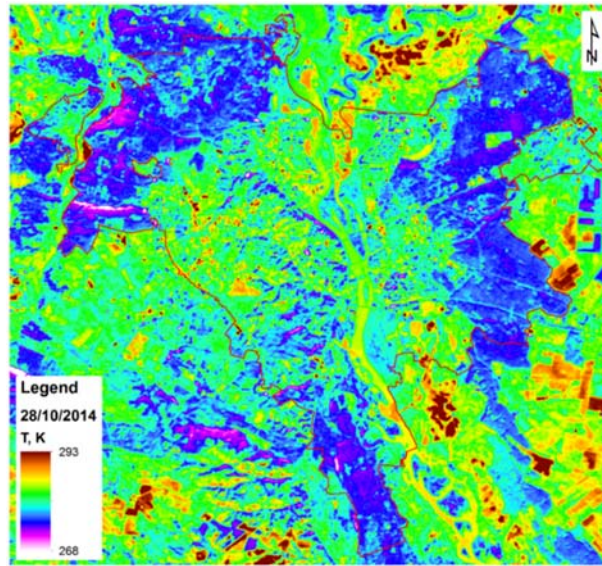


Fig. 7. Brightness temperature of the surface valid as of 28<sup>th</sup> of October (beginning of heating season). LC81810252014301LGN02.

As seen on Fig. 7 actually within the same temperature range the special distribution of temperatures filed is absolutely different. Background thermal indicators of Kyiv city are almost the same as general background indicators (if we are speaking about open areas; the areas with relatively low temperatures marked with blue tones correspond to forests – see Fig. 5). It's obvious that absence of contrast "thermal spot" within city borders is caused firstly by the fact that heating season has just begun and

residential fund objects and infrastructure were not fully heated and secondly by the fact that natural objects (e.g. water in Dnipro river) have not got cold.

The comparison of thermal picture valid as of 28<sup>th</sup> of October (beginning of the heating season) and 28<sup>th</sup> of March (end of heating season) are reasonable and correct, especially from the view of identity of meteorological conditions exactly for these dates [4] (Table 1).

Table 1. Meteo-conditions of ERS data acquisition

ERS data	Date and Time of meteo-characteristics determination	T, °C		
		Air temperature at height of 2 m above the surface	Dew-point temperature at height of 2 m above surface	Te, °C Effective temperature
LC81810252014301LGN02	28/10/2014 12:00	+8,7	-7,4	+10
LE71810252003087ASN00	28/03/2003 12:00	+8	-3	+7

With almost identical meteo-conditions of ERS data acquisition (but during different seasons and with different duration of heating season) it becomes possible to do

quantitative evaluation of thermal anomaly that appears over the city. For this we find the difference between temperature surfaces of indicated dates (Fig. 8).

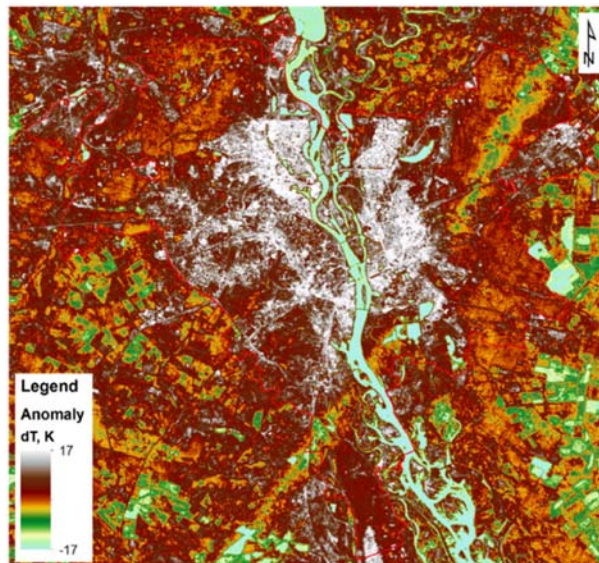


Fig. 8. Characteristics of thermal regime change in Kyiv city during heating season (vs surrounding areas)

Given example confirms earlier stated thesis regarding considerable potential of satellite thermal shooting and circle of tasks which are solved with the help of its results. Introduction of additional data (such as information about weather-conditions, land use/land cover classification, results of radio-location studies, investigations of atmospheric phenomena and processes) will allow to develop unified and special methodologies designed both for thermal pollution control and for increase of energy efficiency of thermal networks and infrastructure of inhabited areas [12, 14, 17].

**Conclusions.** Conducted analysis of condition of ecological and anthropogenic safety of engineering cities and villages infrastructure generally confirms absence of comprehensive approach for defining considerable quantity of natural and anthropogenic threats to safety of life activity in big cities of Ukraine.

Existing system of heat island monitoring does not provide conduction of systematic inspections of the territories in order to find temperature anomalies that may negatively impact ecology of urban environment and population health.

#### Список використаних джерел

1. Бусьгин Б.С. Выявление тепловых аномалий по данным съемки сканера ASTER / Б.С. Бусьгин, И.Н. Гаркуша, Е.П. Зацепин // *Наук. праці До-нец. техн. ун-ту. Сер. гірничо-геологічна*. – 2010. – Вип. 12(173). – С. 260.
2. Геоінформаційні системи в науках про Землю / В.І. Зацерковний, І.В. Тишаєв, І.В. Віршило, В.К. Демидов. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2016. – 510 с.
3. Использование космической схемки при анализе теплового поля исторической части г. Киева / В.Е. Филиппович, В.И. Лялько, С.А. Станкевич, Г.Б. Крылова, А.Г. Мичак // *Проблеми та досвід інженерного захисту урбанізованих територій і збереження спадщини в умовах екологічного ризику : наук. видання*. – К. : Фенікс, 2013. – VI. – С. 64–69.
4. Метеоцентр [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://meteoecenter.net/ua\\_fact.htm](http://meteoecenter.net/ua_fact.htm) – 30.05.2017. – Назва з екрану.
5. Практика применения теплового неразрушающего контроля при энергетических обследованиях многоквартирных жилых домов : учеб.-метод. пособие / Е.П. Комов, О.В. Лебедев, В.С. Поздняк, Д.В. Сенновский, Р.Т. Троицкий-Марков, К.И. Еремин, Е.Л. Алексеева. – Магнитогорск : ООО "ВЕЛД", 2014. – 40 с.
6. Теплове забруднення як екологічна проблема. Екологія і здоров'я (15.11.12). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://childflora.org.ua/?p=34> – 30.05.2017. – Назва з екрану.
7. Шевченко О.Г. Температурні аномалії великого міста / О.Г. Шевченко, С.І. Сніжко, Є.В. Самчук // *Укр. гідрометеорол. журн.* – 2011. – № 8. – С. 67–73.
8. Filipovich V. Use satellite data in monitoring ecological condition of urban landscape / V. Filipovich, A. Mychak, A. Krylova // *14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Conference Proceedings, 2014*. – Т. III, – С. 1061–1068.
9. Heat Island Compendium. United States Environmental Protection Agency [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium> – 30.05.2017. – Назва з екрану.
10. Mahdavi A. Methodologies for UHI Analysis / A. Mahdavi, K. Kiesel, M. Vuckovic // *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*: під ред. F. Musco. – Cham : Springer, 2016. – С. 71–91.
11. Price J.C. Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data / J.C. Price // *Monthly Weather Review*. – 1979. – Т. 107, № 11. – С. 1554–1557.
12. Ren C. Urban climatic map studies: a review / C. Ren, E. Yan-yung Ng, L. Katzschner // *International Journal of Climatology*. – 2011. – Т. 31, № 15. – С. 2213–2233.

13. Stankevich S. Infrared satellite imaging for the study of urban heat islands in Ukraine / S. Stankevich, V. Filipovich // *Proceedings of 8th International Green Energy Conference (IGEC-8)*. – 2013. – С. 219–223.

14. Teerawong L. Urban heat island monitoring and analysis by using integration of satellite data and knowledge based method / L. Teerawong, S. Satith // *International Journal of Development and Sustainability*. – 2012. – Т. 1, № 2. – С. 99–110.

15. The UHI project. Central Europe Programme. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.eu-uhi.eu/> – 30.05.2017. – Назва з екрану.

16. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights. United Nations. – New York, 2014. – 28 p.

17. Xu Y. Monitoring the Near-surface Urban Heat Island in Beijing, China by Satellite Remote Sensing / Y. Xu, Y. Liu // *Geographical Research*. – 2015. – Т. 53, № 1. – С. 16–25.

#### References

1. Busygin, B.S., Garkusha, I.N., Zatepin, E.P. (2010). Vyavlenie teplovykh anomalii po dannym semki skanera ASTER. *Naukovi pratsi Donets'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Hirnycho-geologichna*, 12 (173), 260 p. URL: <http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/10385>. [In Russian].
2. Zatserkovnyi, V.I., Tishaev, I.V., Virshylo, I.V., Demydov, V.K. (2016). Heoinformatsiini systemy v nauках pro Zemliu. NDU im. M. Hoholia, 510 p. [In Ukrainian].
3. Fylyppovych, V.E., Lialko, V.Y., Stankevych, S.A., Krylova, H.B., Mychak, A.H. (2013). Ispolzovanie kosmicheskoi skhemki pri analize teploвого polia istoricheskoi chasti g. Kievа. *Problemy ta dosvid inzhenerного захисту урбанізованих територій і збереження спадщини в умовах екологічного ризику*. "Feniks", VI, 64–69. [In Russian].
4. Meteoecenter. URL: [http://meteoecenter.net/ua\\_fact.htm](http://meteoecenter.net/ua_fact.htm). [In Russian].
5. Komov, E.P., Lebedev, O.V., Pozdnyak, V.S., Sennovskii, D.V., Troitskii-Markov, R.T., Eremin, K.I., Alekseeva, E.L. (2014). Praktika primeneniya teploвого nerazrushaiushchego kontroliа pri energeticheskikh obsledovaniyakh mnogokvartirnykh zhilykh domov: Uchebno-metodicheskoe posobie. "VELD", 40 p. [In Russian].
6. Teplove zabrudnennia yak ekolohichna problema. *Ekologiya i zdorove* (2012). URL: <http://childflora.org.ua/?p=34>. [In Ukrainian].
7. Shevchenko, O.H., Snizhko, S.I., Samchuk, Ie.V. (2011). Temperaturni anomalii velykoho міста. *Ukrainskyi hidrometeorolohichnyi zhurnal*, 8, 67–73. [In Ukrainian].
8. Filipovich, V., Mychak, A., Krylova, A. (2014). Use satellite data in monitoring ecological condition of urban landscape. *14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014*, III, 1061–1068. DOI: 10.5593/SGEM2014/B23/S11.134 URL: <http://www.sgem.org/sgemlib/spip.php?article4332>
9. Heat Island Compendium. United States Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>
10. Mahdavi, A., Kiesel, K., Vuckovic, M. (2016). Methodologies for UHI Analysis. In: *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Musco, F. (Ed.). Springer, Cham, 71–91. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_3)
11. Price J.C. (1979). Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data. *Monthly Weather Review*, 107, 11, 1554–1557. URL: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107%3C1554:AOTUHI%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107%3C1554:AOTUHI%3E2.0.CO;2)
12. Ren, C., Ng, E. Y.-y., Katzschner, L. (2011). Urban climatic map studies: a review. *Int. J. Climatol.*, 31, 15, 2213–2233. doi: 10.1002/joc.2237 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2237/full>
13. Stankevich, S., Filipovich, V. (2013). Infrared satellite imaging for the study of urban heat islands in Ukraine. *Proceedings of 8th International Green Energy Conference (IGEC-8)*. Kiev: NAU, 219–223.
14. Teerawong, L., Satith, S. (2012). Urban heat island monitoring and analysis by using integration of satellite data and knowledge based method. *International Journal of Development and Sustainability*, 1, 2, 99–110. URL: <https://isdsnet.com/ijds-v1n2-4.pdf>
15. The UHI project. Central Europe Programme. URL: <http://www.eu-uhi.eu/>
16. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights. (2014). New York: United Nations, 28 p.
17. Xu, Y., Liu, Y. (2015). Monitoring the Near-surface Urban Heat Island in Beijing, China by Satellite Remote Sensing. *Geographical Research*. 53, 1, 16–25. URL: <http://dx.doi.org/10.1111/1745-5871.12092>

Надійшла до редакції 24.07.17

В. Зацерковний, д-р техн. наук, доц., зав. каф. геоінформатики  
E-mail: [vitalii.zatserkovnyi@gmail.com](mailto:vitalii.zatserkovnyi@gmail.com),  
І. Тишаєв, канд. фіз.-мат. наук, доц.  
E-mail: [ivantishaev@gmail.com](mailto:ivantishaev@gmail.com)  
Київський Національний університет імені Тараса Шевченка  
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

## АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ЩОДО МОНІТОРИНГУ "ОСТРОВІВ ТЕПЛА"

Розглянуто феномен міських "островів тепла", причини їхньої появи і методи дослідження. Міські "острови тепла" визначаються позитивною температурною аномалією, яка локалізується в межах забудованої території та її околів. Для детального аналізу "острова тепла" конкретної території можуть використовуватися різні методи. Сьогодні найчастіше використовують три основні методи дослідження: транспортний, за допомогою мережі спостережень і за матеріалами дистанційного зондування. Найбільш перспективним є метод аналізу і дешифрування супутникових даних. За мету даної роботи покладено аналіз температурних аномалій (що утворюються протягом опалювального періоду) у межах міської агломерації м. Києва на основі даних дистанційних зондувань (даних, отриманих за допомогою супутників місії Landsat). Збудована частина міста характеризується суттєвими тепловими аномаліями.

Останні обумовлені тривалим періодом нагріву, протягом якого встановлюється певний термодинамічний режим: тепло, яке надходить від підземних трубопроводів, розсіюється будівлями, що відображується на карті температур. Значна частина тепла поглинається і згодом розсіюється ґрунтовим середовищем. За майже ідентичних метеорологічних умов збирання даних дистанційних зондувань (але в різні сезони і за різної тривалості опалювального періоду) стає можливою кількісна оцінка термічної аномалії, що утворюється над містом. Залучення додаткових даних (таких як інформація про погодні умови, результати класифікації за типом землекористування і типом відбивних поверхонь, результатах радіолокаційних досліджень, досліджень атмосферних явищ і процесів) дозволить розробити єдині й спеціальні методології, призначені як для контролю теплового забруднення, так і для підвищення енергоефективності теплових мереж та інфраструктури населених пунктів. Існуюча система моніторингу "теплових островів" не забезпечує можливості проведення систематичних перевірок територій з метою відшукування теплових аномалій, які можуть негативно вплинути на екологію міського середовища та здоров'я населення.

Ключові слова: міський острів тепла, мікроклімат, температурні аномалії, тепловий діапазон, щільність забудови.

В. Зацерковный, д-р техн. наук, доц., зав. каф. геоінформатики

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com,

И. Тишаев, канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: ivantishaev@gmail.com

Киевский Национальный университет имени Тараса Шевченко

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К МОНИТОРИНГУ "ОСТРОВОВ ТЕПЛА"

Рассматривается феномен городского "острова тепла" и методов его изучения. Городской "остров тепла" (ГОТ) определяется положительной температурной аномалией, которая локализуется в пределах застроенной территории и ее окрестностей. Для детального анализа острова тепла конкретной территории могут быть использованы различные методы. В настоящее время применяются три основных метода исследования: транспортный, сети наблюдений и по космоснимкам. Наиболее актуальным является метод анализа и дешифрирования космоснимков. Целью данной работы является анализ температурных аномалий, образующихся на протяжении отопительного периода в пределах городской агломерации г. Киева по результатам данных дистанционных зондирований (данных, полученных с помощью спутников миссии Landsat). Застроенная часть города характеризуется существенными тепловыми аномалиями. Последние обусловлены длительным периодом нагрева, во время которого устанавливается определенный термодинамический режим: тепло, которое распространяется от подземных трубопроводов, рассеивается строениями, что и отображается на карте температур. Значительная часть тепла поглощается и рассеивается ґрунтовой средой. При практически одинаковых метеорологических условиях сбора данных дистанционных зондирований (но полученных в разные сезоны и в условиях разной длительности отопительного периода) становится возможной количественная оценка термической аномалии, образующейся над городом. Привлечение дополнительных данных (таких как информация про погодные условия, результаты классификации по типу землепользования и видам отражающих поверхностей, результатов радиолокационных исследований, исследований атмосферных явлений и процессов) позволит разработать единые и специальные методологии, предназначенные как для контроля теплового загрязнения, так и для повышения энергоэффективности тепловых сетей и инфраструктуры населенных пунктов. Существующая система мониторинга тепловых островов не обеспечивает возможности проведения систематических проверок территорий с целью поиска тепловых аномалий, которые могут негативно влиять на экологию городской среды и здоровье населения.

Ключевые слова: городской остров тепла, микроклимат, глобальное потепление, плотность застройки, сельская местность.

УДК 550.41

Ю. Тютюнник, д-р геогр. наук, проф., пров. наук. співроб.

E-mail: carne1@mail.ru

Інститут еволюційної екології НАН України  
вул. Акад. Лебедєва, 37, м. Київ, 03143, Україна,  
О. Шабатура, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.

E-mail: sand@univ.kiev.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

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

Х. Дауніс-і-Естадел'я, д-р філософії, доц.

E-mail: pepus.daunis@udg.edu

Університет Жирони, Відділення інформатики, прикладної математики і статистики

Кампус Монтеліві E-17071a, м. Жирона, Іспанія

## ГЕОСТАТИСТИЧНЕ ВИВЧЕННЯ ЛАТЕРАЛЬНОГО І РАДІАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ҐРУНТОВОМУ ПОКРИВІ ЗОНИ ПОМІРНОГО ТЕХНОГЕНЕЗУ (на прикладі субурбії київського мегаполісу)

(Рекомендовано членом редакційної колегії канд. геол. наук О.І. Меньшовим)

Розподіл концентрацій хімічних елементів у ґрунтового покриві залежить від дії природних і техногенних факторів і характеризується різними закономірностями міграції та накопичення в латеральному і радіальному напрямках. Вивчення концентрацій хімічних елементів в ґрунтах різних елементарних геохімічних ландшафтів дозволило визначити деякі із статистично значущих закономірностей розподілу хімічних елементів на території Ірпінь-Буча-Ворзельської субурбії Київського мегаполісу. Результати аналізу 190 проб із 36 повнопрофільних ґрунтових розрізів лягли в основу бази складених даних (CoDa-дані), що утворюються векторним добутком усіх вимірних величин концентрацій хімічних елементів у кожній пробі ґрунту. Геостатистична модель "біплов" CoDa-даних являє собою гіперпростір геохімічних факторів і причин з розмірністю, що відповідає кількості визначених у пробах хімічних елементів. Проекція цього гіперпростору на площину у вигляді "зірки" біплоту з одночасним нанесенням на площину проекції точок пробовідбору дає можливість наочно відслідковувати імовірнісні (статистичні) показники маркування хімічними елементами дії тих чи інших геохімічних чинників і причин, що мають місце на досліджуваній території. Кластеризація точок пробовідбору відбувається в областях імовірнісного впливу на відповідну групу проб певних геохімічних факторів. Установлено, що геостатистичними параметрами, отриманими при моделюванні CoDa-даних щодо вмісту в ґрунтах La-Ce-Nd у 12-вимірному та Fe-Sr-Ga у 9-вимірному гіперпросторах, позначається область, в якій виявляє геохімічний фактор "вплив вихідного мінерального складу ґрунтоутворювальної породи". Область, що окреслюється відповідними геостатистичними параметрами Rb-Sr-Ba у 12-вимірному та Ba-Rb у 9-вимірному гіперпросторах, статистично "прив'язана" до кислотно-лужних умов у ґрунтах. Область марганцю в обох зазначених гіперпросторах та заліза у 6-вимірному маркує окисно-відновні умови в ґрунтах. Область Pb маркує техногенез (особливо його пірогенну складову, пов'язану з автотранспортними викидами). Область Zn-Cu пов'язана з дією і впливом, у першу чергу, біогенних процесів гумусоутворення, гумусонакопичення, торфонакопичення (біогенез). За силою відносного впливу на елементний склад верхнього (10 см) шару ґрунтів обстеженої території геохімічні фактори розташовуються так: техногенез > біогенез > вплив вихідної літогенної основи. При аналізі моделі 6-вимірного гіперпростору виявлена загальна тенденція до розділення точок між областями, що маркують Fe-Sr-Ba-Rb (літолого-мінералогічний чинник) і Pb (техногенез, насамперед атмосферне забруднення, спричинене автотранспортом). Для точок ґрунтового пробовідбору з підлеглих ландшафтів проглядається тенденція групуватися в областях, що маркуються Fe-Sr-Ba-Rb і Zn (біогенез), з одного боку, і Pb та Zn, – з іншого. Геохімічні чинники і причини виразніше виявляють себе при аналізі CoDa-даних проб, відібраних з прив'язкою до генетичних ґрунтових горизонтів, аніж таких, що були відібрані з прив'язкою до глибини взяття проби – суто формальної ознаки.

**Ключові слова:** біплов, гіперпростір геохімічних чинників і причин, складені дані, техногенез, біогенез, літолого-мінералогічний чинник.

Дослідження виконувалися в західній субурбії Київського мегаполісу в межах трикутника, утвореного населеними пунктами м. Ірпінь – смт Буча – м. Ворзель. Рекреаційна специфіка території поєднується зі значною промисловою діяльністю (машинобудування, виробництво будматеріалів, скловиробів, деревообробка та виготовлення меблів, харчова промисловість); розвиненим житловим будівництвом та осушувальними меліораціями в долині річки Ірпінь. Крім того, територія має розгалужену транспортну інфраструктуру (автодороги, залізниці, аеродром). При східних вітрах вона може зазнавати впливу забруднених повітряних мас, що сформувалися над Києвом. У фізико-географічному відношенні – це південна частина Київського Полісся з переважанням зандрових, морено-зандрових і заплавних ландшафтів. Гідрографічна мережа добре розвинена, але перепади висот незначні – долини неглибокі.

З урахуванням ландшафтно-ї структури території, було закладено 36 повнопрофільних ґрунтових розрізів, з яких 26 віднесено до автономних і 13 – до підлеглих елементарних геохімічних ландшафтів (ЕГЛ). У розрізах погоризонтно (для кожного генетичного ґрунтового горизонту) було відібрано 190 проб, які аналізувалися рент-

ген-флуоресцентним методом на кафедрі геохімії, мінералогії та петрографії ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Розглянуті літературні матеріали свідчать про суттєвий вплив усіх чинників техногенезу (промисловості, енергетики, транспорту, сільського господарства, соціального комплексу, який формує побутові викиди та звалища, військово-промислового комплексу та ін.) на латеральний і радіальний розподіл концентрацій хімічних елементів у ґрунтах [1–4, 11, 13, 23], у тому числі й на територіях рекреаційного призначення [3, 11, 21]. Техногенне забруднення ґрунтів, крім різного геохімічного навантаження, має і відмінну просторову характеристику – зазвичай формуються ареали навколо осередкових джерел забруднення (сягаючи 20–25 км [12]), або витягнуті вздовж шляхів ореоли (завширшки перші сотні метрів), що виявляється як на локальному, так і на регіональному рівнях.

Найбільш поширені математичні способи обробки даних геохімії ґрунтів – факторний аналіз для виявлення залежностей і структури діючих факторів [14, 19, 24]; інтегрування різномасштабних даних – для пошуку розмежувальних просторових меж і показників [17, 20]; кластер-аналіз – установлення спорідненості між окремими об'єк-

тами на основі аналізу множини ознак; так і "класичні" методи множинної регресії та кореляційного аналізу [14]. Застосовуються також більш складні ймовірнісно-математичні алгоритми, наприклад "автомат Мура" – для оцінки міграційного накопичення техногенних забруднювачів у ґрунтах [8], зокрема кобальту, свинцю, міді, цинку. З іншого боку, будь-якому математичному моделюванню має передувати ґрунтовне ландшафтне-геохімічне вивчення досліджуваної території, оскільки нерівномірність техногенного розподілу елементів збільшується неоднорідністю геохімічної обстановки в геохімічних ландшафтах [12].

Знайдено фактори розподілу екотоксикантів у ґрунтових покривах і виявлено відносну факторизацію та кластеризацію їх у загальній дії забруднення; за вмістом у ґрунті Fe, Mg, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr і Cd на першому місці виявилася висота точки відбору проб ґрунту, на другому – відстань до сміттєзвалища, на третьому – відстань до дороги, на четвертому – крутизна схилу, а на п'ятому – глибина відбору проб [2]. Але разом із тим, застосовані математичні методи до багатопараметричного аналізу геохімічних даних ґрунтових покривів, зокрема для цілей виявлення діючих факторів міграції ряду хімічних елементів та їхньої інтенсивності впливу, мають переважно якісний характер, не оперують кількісними показниками, а отже, залежать здебільшого від фаховості та ерудиції інтерпретатора.

Нами за мету роботи поставлено вивчення латерального і радіального розподілу хімічних елементів у ґрунтах (зазначеного району) за допомогою відносно нового напрямку математичного моделювання в геохімії ґрунтів – геостатистичного аналізу складених даних (CoDa-даних або просто CoDa) методом "біплов". Основи такого моделювання розроблялися в Департаменті інформатики та прикладної математики Університету Жирони (Іспанія) [5, 16, 18, 22].

**Методика досліджень.** Робоча гіпотеза дослідження, а також її практична апробація в конкретних геохімічних дослідженнях навколишнього середовища викладена в [16, 18]. Її головні положення такі:

1. Хімічний склад проби уявляється у формі векторного добутку всіх визначених в ній концентрацій хімічних елементів і отримання CoDa-даних.

2. Кожен хімічний елемент можна розглядати як маркер того чи іншого геохімічного чинника або групи чинників, що обумовлюють його наявність у пробах. У сукупності всі хімічні елементи утворюють гіперпростір геохімічних факторів і причин з розмірністю, що відповідає кількості елементів. Гіперпростір має імовірнісно-статистичну природу і будується на основі CoDa-даних.

3. Гіперпростір геохімічних факторів і причин візуалізується у вигляді двовимірної проєкції, що зветься "біплов" і нагадує за формою зірку, кожен "промінь" якої відповідає прояву якоїсь геохімічної причини, окреслює собою у гіперпросторі й візуально – на проєкції ту область, де ця причина виявляється (рис. 1–3). Об'єднання променів у пучок, тобто зменшення кута між ними, свідчить про спорідненість причин, що обумовлюють наявність відповідних хімічних елементів у CoDa-даних. Повного збігу променів, так само як і абсолютного ідентифікуючого значення для кожного хімічного елемента, звісно, не буває. Може йти лише про *імовірності* маркування хімічним елементом того чи іншого геохімічного процесу. Фактичне зближення променів у гіперпросторі, їхня схильність до об'єднання в пучок вимірюється величинами дисперсій логарифмів відношень концентрацій двох сусідніх хімічних елементів A та B –  $[lgA/lgB]$ . Чим менший кут між променями, тим менша величина відношення  $[lgA/lgB]$ . Довжина променя пропорційна силі дії фактора, який з тією чи іншою імовірністю маркується відповідним

хімічним елементом і характеризується величиною середньої варіабельності дисперсій хімічного елемента  $[X]_i$ , що входить до CoDa. Відповідно, довжину променя  $l$  можна розрахувати як суму всіх його дисперсій (var), розділену на розмірність гіперпростору  $k$  ( $k$  – кількість співмножників у CoDa):

$$l = \frac{\sum \text{var} [X]_i}{k}$$

Чим більша величина  $l$ , тим довший промінь. Слід пам'ятати, що перед нами двовимірна проєкція  $k$ -розмірного гіперпростору, тому спотворення кутів і довжин тут неминучі.

Розшифровка біплов полягає у правильній ідентифікації геохімічної причини, яка "змушує" об'єднуватися промені в пучки або, навпаки, займати відсторонене окреме положення у площині проєкції. За довжинами променів робиться висновок щодо ступеня (сили) прояву цих причин.

4. Конфігурація "зірки" біплов залежить від набору складових у CoDa. Виключаючи або додаючи хімічні елементи в CoDa, ми тим самим впливаємо на маркування ними геохімічних причин. Тому біплоти, складені з результатів аналізів одних і тих же проб, можуть відрізнятися конфігурацією залежно від того, в якому числі й яких комбінаціях у CoDa входять елементи-маркери. Одна і та ж сама геохімічна причина може при одному наборі елементів-маркерів маркуватися одним хімічним елементом (елементами), при іншому – іншим. Зокрема, якщо в CoDa відсутні компоненти – сильні маркери, то вона буде маркуватися середніми або навіть слабкими за силою маркерами. Але з появою в наборі CoDa даних потужних елементів-маркерів роль середніх виявиться вже статистично нерозрізною. Тому варіювання наборів хімічних елементів-маркерів у процесі геостатистичного аналізу (що супроводжується змінами розмірності гіперпростору) дозволяє виявляти досить "тонку" структуру у "ґрі" різноманітних геохімічних факторів і причин, що визначають хімічний склад проб.

5. Точки, що позначають CoDa кожної проби, можна нанести на графік біплов. Якщо вплив будь-яких із геохімічних факторів і причин буде превалювати в тій чи іншій групі проб, то відповідні їм точки почнуть групуватися (кластеризуватися) в області гіперпростору, що позначатиметься променями тих хімічних елементів, які маркують саме ці чинники і причини. У граничному випадку, коли кількість компонент-маркерів зводиться до трьох, біплоти можуть бути замінені трикутними діаграмами. Використання останніх – традиційний інструмент статистичного аналізу багатьох геохімічних явищ і феноменів.

**Результати досліджень.** Аналіз даних геостатистичного моделювання CoDa-даних 190 проб з подальшим представленням результатів у вигляді "зірок" біплов був виконаний за трьома групами хімічних елементів-маркерів, що входять до CoDa: за Mn, Fe, Cu, Zn, Ga, Rb, Ba, La, Ce, Nd, Sr, Pb (12-вимірний гіперпростір); за Mn, Fe, Cu, Zn, Ga, Rb, Ba, Sr, Pb (9-вимірний гіперпростір); за Fe, Zn, Rb, Ba, Sr, Pb (6-вимірний гіперпростір).

Розшифровка біплов 12-вимірного простору (рис. 1) вказує, що пучок променів La-Ce-Nd позначає область, в якій проявляє себе такий геохімічний фактор, як "вплив вихідного мінерального складу ґрунтоутворювальної породи". Ніяких інших джерел TR у ґрунтах дослідженої території немає, до складу ж природних мінералів, зокрема, бастнезиту  $[(Ce, La)(CO_3)F]$  і монациту  $[(Ca, Ce, La, Th) \cdot PO_4]$  входять рідкоземельні елементи. Пучок променів Rb-Sr-Ba маркує швидше за все такий фактор, як "кисло-лужні умови", причому такі, що залежать не стільки від актуальної, скільки від гідролітичної кислотності ґрунтів.



Промінь Mn позначає область дії такого геохімічного фактора, як "окисно-відновні умови", а променем Fe, імовірно за все, маркується область виявлення сумісного впливу кислотно-лужних і окисно-відновних параметрів ґрунтів, взаємозв'язаних між собою. Подібного роду залежності для селену і ртуті відмічено в [11], де вміст заліза разом з іншими ґрунтологічно-геохімічними факторами (механічний склад, наявність глинистих мінералів, розміри мулуватих частинок, водний режим, обмінні властивості, відновно-окисні властивості, вміст органічної компоненти тощо) визначають їхню мобільність.

Свинець Pb є типоморфним хімічним елементом автотранспортних викидів [7], його промінь указує на область гіперпростору, в якій проявляє себе геохімічний

фактор техногенезу, насамперед у цій формі. Причому, як можна бачити з рисунку, сила його прояву – найбільша порівняно з усіма іншими геохімічними факторами, виявленими на даній території. Звідси випливає простий висновок: провідним фактором техногенного забруднення всієї вивченої території є автотранспортні викиди, за [2] область транспортних викидів може сягати 450–500 м, тому точки опробування були свідомо закладені нами на значних відстанях від автомагістралей. Проте висока щільність автодоріг субурбії виявилася занадто значимою, для того щоб відображення джерел забруднень локально-лінійної форми набуло обрисів фактично площинного ареалу.

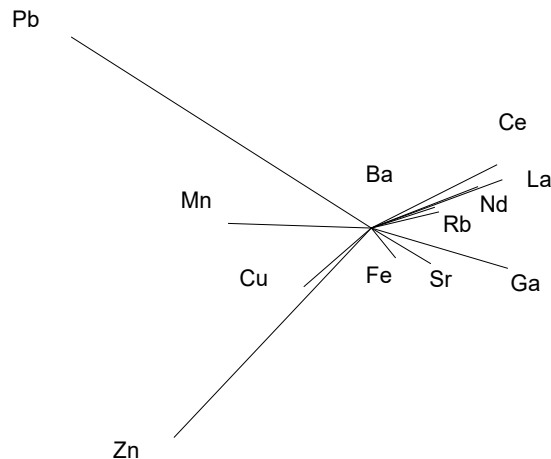


Рис. 1. Двовимірна модель (біплов) 12-вимірного гіперпростору геохімічних факторів і причин, що визначають елементний склад ґрунтових проб, відібраних в околицях Ірпеня, Бучі, Ворзеля (Київська обл.)

Область гіперпростору, що маркується групою Zn-Cu, пов'язана з біогенними процесами утворення, накопичення і трансформації органічної речовини (біогенез), які, як підкреслювалося вище, на території обстеженої території виявляють себе досить інтенсивно. Цинк, як бачимо, виступає сильнішим маркером біогенезу, ніж мідь.

Залишається неясною роль Ga. Геохімія цього елемента вивчена погано, джерел надходження до ґрунту, крім як у складі природних мінералів, немає, але є свідчення про досить активне включення галію в процеси біогенезу [8]. Можливо, область гіперпростору, що маркується його променем, це також область інтерференції різних факторів і причин. У будь-якому разі його відносна близькість до променя заліза нашою думкою.

Із біплота 9-вимірного гіперпростору геохімічних факторів і причин вилучена група TR (рис. 2). Однак це не означає, що роль мінералогічної основи перестала маркуватися хімічними елементами, просто вона перейшла до слабших геохімічних маркерів цього фактора. Ми вважаємо, що статистично достеменним маркером літолого-мінералогічного чинника в 9-вимірному гіперпросторі виступає група Fe-Sr-Ga, причому Sr-Ga – чіткіше, ніж Fe. Останнє одночасно "змушено" відігравати і більш слабку роль індикатора окисно-відновних умов. Промені Ba-Rb і раніше маркували рН-умови з "акцентом" на гідролітичну кислотність, Zn-Cu – фактор біогенезу, а Pb – техногенного навантаження, головним чином, автотранспортного або "біохімічного" фактора за [5].

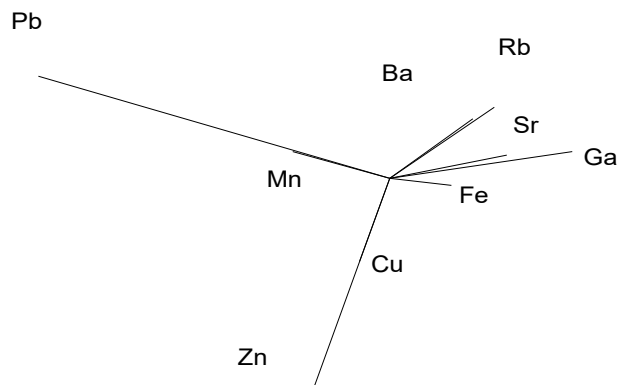


Рис. 2. Біплов 9-вимірного гіперпростору геохімічних факторів і причин, що визначають елементний склад ґрунтових проб, відібраних в околицях Ірпеня, Бучі, Ворзеля (Київська обл.)

Викликає питання поведінка марганцю. Здається, що він "приєднався" до свинцю і теж став типоморфним елементом автотранспортних викидів. Однак насправді він лише маскує свою геохімічну поведінку техногенною дією. Тут, насправді, ми маємо справу із спотворенням 9-вимірного простору при проектуванні на двовірну площину. Конфігурація променя Mn переважно радіальна, а променя Pb – тангенціальна, тому проекція першого майже точно падає на проекцію другого, створюючи тим самим ілюзію злиття променів. Насправді промінь Mn

значно більш незалежний (і, зауважимо, ближче до променю заліза), і маркує він те ж саме, що і в 12-вимірному гіперпросторі: Eh-умови ґрунту.

При вилученні Mn, Cu, Ga (рис. 3) біplot досить чітко розділився на три області: область техногенезу (Pb), область біогенезу (Zn) та область природних абіогенних факторів (група Fe-Sr-Ba-Rb). Остання містить слабкові-докремлені підобласті – рН-умов (Ba-Rb, частково Sr), впливу мінералогічної основи (Sr, частково Fe) та Eh-умов (частково Fe).

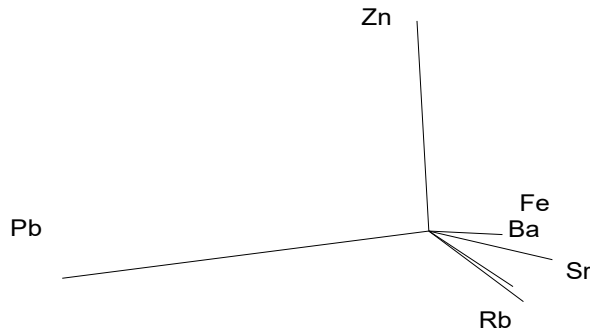


Рис. 3. Біplot 6-вимірного гіперпростору геохімічних факторів і причин, що визначають елементний склад ґрунтових проб, відібраних в околицях Ірпеня, Бучі, Ворзеля (Київська обл.)

При цьому перші дві області геохімічних факторів сильно індивідуалізовані (чітко окреслені в гіперпросторі), а остання – досить розмита, оскільки в ній враховуються другорядні, проміжні, часткові геохімічні ролі одних і тих самих хімічних елементів. Також з рис. 3 видно, що за силою відносного імовірнісного впливу на елементний склад ґрунтів обстеженої території (оцінюється за довжиною променів) геохімічні фактори в першому наближенні розташовуються в такому порядку: техногенез (переважно автотранспортні викиди) > природні біогенні процеси > природні абіогенні причини і процеси.

**Кластеризація CoDa-даних.** Нанесення точок, що відповідають CoDa-даним ґрунтових проб, на графіки бі-плотів, а також на трикутні діаграми дозволило простежити тенденції до кластеризації цих точок в областях дії геохімічних чинників і причин, що маркуються відповід-

ними хімічними елементами, визначеними у пробах. Емпірично точки пробовідбору попередньо групувалися за такими ознаками: а) автономні й підпорядковані елементарні геохімічні ландшафти; б) генетичні ґрунтові горизонти; в) формальні глибини відбору проби (інтервал у сантиметрах глибини).

**Кластеризація за різновидом ЕГЛ.** На рис. 4, а показано розміщення точок, відповідних CoDa-даними про вміст хімічних елементів у ґрунтових пробах (верхні 10 см), у площині бі-плоту 6-вимірного гіперпростору. Усі точки згруповані за автономним і підлеглим ЕГЛ. А на рис. 4, б показано той же розподіл у 3-вимірному просторі геохімічних факторів і причин, представлений кластерною центрованою трикутною діаграмою. При цьому маркерами обрано найсильніші індикатори відповідних геохімічних чинників – La, Zn і Pb.

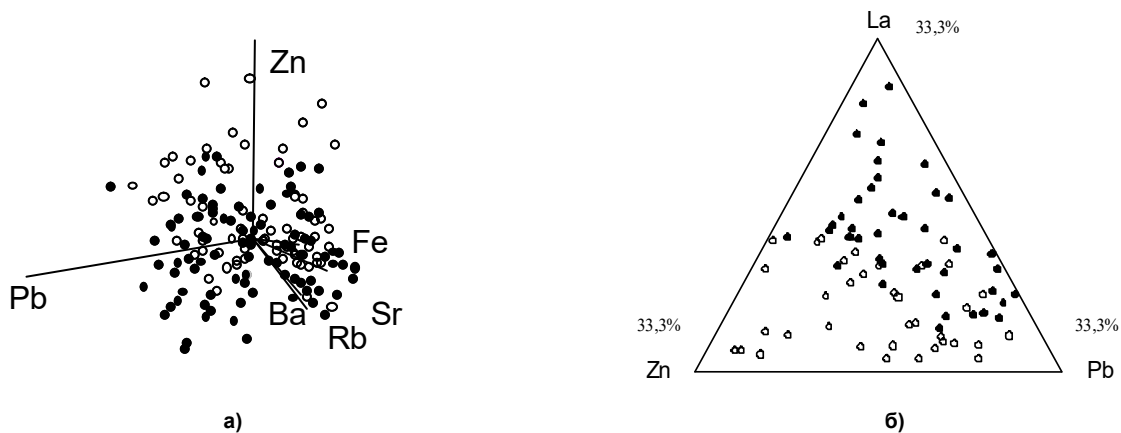


Рис. 4. Розміщення точок, відповідних CoDa-даними щодо вмісту хімічних елементів у ґрунтових пробах (0–10 см), які були відібрані в околицях Ірпеня, Бучі, Ворзеля (Київська обл.), згрупованих за автономними (чорні точки) і підлеглими (прозорі точки) ЕГЛ у площині бі-плоту 6-вимірного гіперпростору (а) та на центрованій трикутній діаграмі (La, Zn і Pb) геохімічних факторів і причин (б)

Для точок проб з автономних ландшафтів має місце тенденція групуватися між областями Fe-Sr-Ba-Rb (літо-

лого-мінералогічний фактор) і Pb (атмосферне забруднення). Те ж саме явище ще виразніше спостерігається і

на трикутній діаграмі. Для точок проб, відібраних у підлеглих ландшафтах, проглядається тенденція групуватися в областях Fe-Sr-Ba-Rb і Zn (біогенез), з одного боку, і Zn та Pb, – з іншого. Можна також зауважити, що на рис. 4, а точки проб з автономних ландшафтів краще групуються в області літолого-мінералогічного фактора, ніж точки з підпорядкованих ландшафтів, які тяжіють до підобласті Fe, в якій активніше проявляє себе фактор Eh-умов. Ще гірше вони групуються в "літологічний" області на рис. 4, б – у присутності лантану, дуже сильного маркера для літолого-мінералогічних чинників, але вельми незначного для Eh-умов.

Відомо, що топографічно-припідняті ділянки місцевості зазнають сильнішого впливу забруднених повітряних мас, що рухаються горизонтально у приземній атмосфері. Водночас ґрунтовий профіль елювіальних ландшафтів, приурочених до цих же підвищених, ділянок, зазвичай коротший від такого ж супереквального ЕГЛ. Це означає, що ступінь участі вихідних ґрунтоутворювальних ґрських порід у формуванні геохімічних особливостей ґрунтів підвищених автономних ЕГЛ буде вищим. То ж зрозумілим стає виявлений розподіл точок CoDa-даних проб: автономні ландшафти більш залежні від впливу атмосферного забруднення і мінералогічного складу вихідних ґрунтоутворювальних порід, ніж підпорядковані ЕГЛ.

Навпаки, процеси біогенезу обумовлюють зростання потужності гумусованих і оторфованих шарів ґрунтів у підлеглих ЕГЛ. Крім того, вони сприятливіші до процесів оглеювання та сильніше залежать від Eh-умов. Це виявилось в даному дослідженні у сильнішій залежності підпорядкованих ЕГЛ від процесів біогенної міграції речовини, а також від показників і динаміки Eh ґрунту.

У принципі, це відомі, емпірично встановлені факти з геохімії техногенезу та геохімії ґрунтів [4, 6, 12, 13] щодо розвитку процесів самоочищення від техногенного забруднення автономними ландшафтами і консервації й накопичення – акумулятивними. Але в даному випадку вони отримують математико-статистичне підтвердження.

**Генетична кластеризація.** Аналіз розподілів засвідчив, що в разі пробовідбору, "прив'язаного" по вертикалі до генетичних горизонтів, точки CoDa-даних проб з горизонту  $H_2$  мають тенденцію групуватися в областях Zn (біогенез) і Pb (атмосферне забруднення), що виглядає цілком логічним. Точки CoDa-даних проб з горизонту P чітко групуються в області TR і більш розпливчасто в областях Fe і Ga, причину чого з вище викладеного матеріалу також не складно зрозуміти. Залізо, крім цього, виступає досить слабким, але помітним маркером групування точок, відібраних з горизонту I. Утворення цього горизонту, як відомо, пов'язано з осадженням складних оксидів, серед яких гідроксиди Fe – одні з найважливіших. Навпаки, цинк не виявляє жодних тенденцій до "збирання" точок CoDa-даних проб з горизонту I. Групування точок CoDa-даних проб з глейових горизонтів слабе, в основному його можна помітити в області Rb-Sr-Ba (лужно-кислотні умови), гірше – в області Mn і частково Fe (Eh-умови). Оскільки саме в глейових горизонтах спостерігається найбільш складна динаміка pH- і Eh-умов, то таке групування точок, хоч і слабо виражене, виглядає логічним. Точки CoDa-даних проб з горизонтів H і E не виявляють тенденцій до жодної кластеризації. Щодо горизонту H, це може свідчити про високу різноманітність геохімічних процесів і умов, що мають місце в цьому горизонті, коли ґрунти не згруповані за ЕГЛ. Що ж стосується горизонту E, то відсутність тенденції до кластеризації точок CoDa-даних проб у нашому випадку свідчить швидше про відсутність у списку проаналізованих хімічних елементів повноцінного маркера тих геохімічних причин, які обумовлюють специфіку горизонту E. Визначай ми, зокрема, вміст Si, обов'язково точки згрупувалися б в маркованій ним області, адже кремнеземиста присипка є типовою для елювіального горизонту.

**Кластеризація за інтервалами глибин пробовідбору.** Вивчення угруповань точок CoDa-даних проб, об'єднаних за формальним показником – інтервалами глибин відбору проби, без урахування її належності до генетичного горизонту, показало, що біля цинку і свинцю чітко групуються точки CoDa-даних проб із шарів 0–5 см і 5–10 см. Цей факт можна пояснити для свинцю добре відомим [10] фактом сильної абсорбції гумусовою речовиною тих його фракцій, які надходять на поверхню ґрунту з атмосферним забрудненням; а для цинку – найважливішою роллю цього хімічного елемента в процесах біогенезу, до яких належить гумусоутворення та гумусо-накопичення у верхніх 10 см ґрунту.

У шарах 10–15 см, 15–20 см, 20–30 см, 30–50 см тенденцій до якої б то не було кластеризації точок CoDa-даних ґрунтових проб по глибинних шарах не спостерігається. У цій ґрунтовій товщі має місце дуже велике розмаїття генетичних горизонтів і геохімічних процесів. Якщо ЕГЛ не групувати бодай за належністю до підвищень і понижень рельєфу, то це не дає можливість проявитися будь-яким "наскрізним" тенденціям до кластеризації точок CoDa-даних проб. Але, починаючи з 50 см, тенденція до кластеризації точок CoDa-даних знову з'являється і поступово посилюється з глибиною пробовідбору (групи 50–100 см і > 100 см). Вона обумовлена літолого-мінералогічним фактором, областю кластеризації виступає та область гіперпростору геохімічних факторів і причин, яка маркується променями рідкісноземельних елементів. З викладеного випливає такий цікавий висновок, який слід враховувати при організації пробовідбору, принаймні в районах, аналогічних за геохімічними умовами тому, що нами вивчався. В умовах території "субурбія Київського мегаполісу – південь Київського Полісся" хімічний склад проб ґрунтів, відібраних формально "пошарово" у діапазоні 10–50 см без прив'язки до генетичних ґрунтових горизонтів і загальному випадку може свідчити про які завгодно геохімічні процеси і феномени. Проби, відібрані до глибини 10 см, з високим ступенем імовірності свідчать про процеси атмосферного забруднення та особливості біогенезу в першому випадку та про вплив природної літогенно-мінералогічної основи – ґрунтоутворювальних порід – у другому. Це слід урахувати в разі здійснення відбору проб формально "пошарово" – без прив'язки до ґрунтових генетичних горизонтів. Така методика відбору ґрунтових проб усе ще широко застосовується, хоч в останні роки в геохімії ґрунтів усе більшого поширення набуває спосіб відбору проб ґрунтів із середніх ділянок кожного генетичного ґрунтового горизонту, що, очевидно, більш адекватно.

**Висновки.** Розроблена геостатистична модель "білот" CoDa-даних у вигляді гіперпростору геохімічних факторів і причин із заданою розмірністю наочно продемонструвала швидкий спосіб розв'язку низки прикладних задач ґрунтознавства.

Геостатистичне вивчення умов розподілу хімічних елементів у ґрунтових горизонтах дозволяє відслідковувати імовірнісні (статистичні) показники маркування хімічними елементами дії тих чи інших геохімічних чинників і причин, що мають місце на досліджуваній території.

Геостатистичними параметрами, отриманими при моделюванні CoDa-даних щодо вмісту в ґрунтах La-Ce-Nd в 12-вимірному та Fe-Sr-Ga в 9-вимірному гіперпросторах, позначається область, в якій проявляє себе такий геохімічний фактор, як "вплив вихідного мінерального складу ґрунтоутворювальної породи". Область, що окреслюється відповідними геостатистичними параметрами Rb-Sr-Ba у 12-вимірному та Ba-Rb у 9-вимірному гіперпросторах, статистично "прив'язана" до кислотно-лужних умов у ґрунтах. Область марганцю в обох гіперпросторах і заліза в 6-вимірному маркує окисно-відновні умови в ґрунтах, при цьому Fe частково маркує і кислотно-лу-

жні умови, що пов'язані з Eh показником. Область Pb маркує фактор техногенезу, особливо його пірогенну складову, пов'язану з автотранспортними викидами. Область Zn-Cu пов'язана з дією і впливом, у першу чергу біогенних процесів гумусоутворення, гумусонакопичення, торфонакопичення (біогенез).

За силою відносного впливу на елементний склад верхнього (10 см) шару ґрунтів обстеженої території геохімічні фактори розташовуються в низхідній послідовності: техногенез > біогенез > вплив вихідної літогенної основи.

При аналізі моделі 6-мірного гіперпростору виявлено тенденцію до дискримінації точок різної ландшафтно-геохімічної підпорядкованості. Для точок проб з автономних ландшафтів має місце тенденція групуватися між областями, що маркуються Fe-Sr-Ba-Rb (літолого-мінералогічний чинник) і Pb (техногенез, насамперед атмосферне забруднення, спричинене автотранспортом). Для точок ґрунтового пробвідбору з підлеглих ландшафтів простежується тенденція групуватися в областях, що маркуються Fe-Sr-Ba-Rb і Zn (біогенез) – з одного боку і Zn та Pb – з іншого.

Геохімічні чинники і причини виразніше виявляють себе при аналізі CoDa-даних проб, відібраних з прив'язкою до генетичних ґрунтових горизонтів, аніж таких, що були відібрані з прив'язкою до глибини взяття проби – суто формальної ознаки.

#### Список використаних джерел

- Белозерцева И.А. Техногенное воздействие на почвы урбанизированных территорий Сибири / И.А. Белозерцева, Д.Н. Лопатина // Фундаментальные исследования. Геогр. науки. – 2015. – № 2. – С. 5397–5403.
- Бузіна І. М. Дослідження стану ґрунтів в умовах установки техногенезу / І. М. Бузіна // Вісн. ЖНАЕУ. – 2012. – № 2. – Т. 1. – С. 232–241. (<http://ir.znau.edu.ua/handle/123456789/298>)
- Войціховська А.С. Поширення різних за рухомістю форм цинку в ґрунтах у зоні техногенезу сміттєзвалищ / А.С. Войціховська, В.В. Карабин, В.Д. Погребенник // Наук. праці ДонНТУ. Сер. гірничо-геологічна. – 2013. – Вип. 19(209). – С. 3–9.
- Войцицкий А.П. Техноэкология / А.П. Войцицкий, В.П. Дубровский, В.М. Боголюбов; за ред. В.М. Боголюбова. – К. : Аграрна освіта, 2009. – 533 с.
- Геостатистика и география почв / отв. ред. П.В. Красильников. – М. : Наука, 2007. – 175 с.
- Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М. : Недра, 1990. – 335 с.
- Ізюмова О.Г. Водно-фізичні властивості ґрунту в умовах техногенезу / О.Г. Ізюмова // Агроекол. журн. – 2013. – № 3 – С. 29–35.
- Імовірно-автоматне моделювання в дослідженнях міграційних процесів у ґрунтах / О.А. Котовенко, О.Ю. Мірошніченко, Ю.О. Березницька та ін. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/10 (70). – С. 37–43.
- Йованович Л. Влияние техногенеза на биосферу (на примере селена и ртути) / Л. Йованович, В. Ермаков // Научни трудове на русенския университет. – 2010. – Т. 49, сер. 1, 2. – С. 114–119.
- Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях: пер. с англ. / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М. : Мир, 1989. – 426 с.
- Карабин В.В. Форми знаходження міді у ґрунтах в зоні техногенезу сміттєзвалищ / В.В. Карабин, А.С. Войціховська, В.Д. Погребенник // Наукові праці Донец. техн. ун-ту. Сер. гірничо-геологічна. – 2012. – Вип. 16(206). – С. 193–198.
- Назаренко І.І. Ґрунтознавство / І.І. Назаренко, С.М. Польчина, В.А. Нікорич. – Чернівці : Книги–XXI, 2004. – 400 с.
- Степанова Л.П. Влияние техногенеза на геохимию и экологическую емкость ландшафта / Л.П. Степанова, Е.А. Коренькова. – Орел : Изд-во Орел. ГАУ, 2010. – 260 с.
- Тютюнник Ю.Г. Удельное электрическое сопротивление генетических горизонтов почв / Ю.Г. Тютюнник, И.И. Онищук, А.В. Шабатура // Почвоведение – 2004. – № 2. – С. 209–213.
- Тютюнник Ю.Г. Математичне моделювання міграції та накопичення  $^{40}\text{K}$  і  $^{137}\text{Cs}$  у ґрунтах Ірпінь-Буча-Ворзельської рекреаційної зони / Ю.Г. Тютюнник, М.І. Толстой, О.В. Шабатура // Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища : тез. доп. IV Міжнар. наук. конф., Київ 9–11 жовт. 2003 р. – 2003. – С. 101–102.
- Aitchison J. Biplot of compositional data / J. Aitchison, M. Greenacre // Applied Statistics. – 2002. – Vol. 51. – P. 375–392.
- An Interdisciplinary and Synthetic Approach to Ecological Boundaries / M.L. Cadenasso, S.T.A. Pickett, K.C. Weathers et al. // BioScience – 2003. – Vol. 53, 8. – P. 717–722.
- Cruz-Bello G.M. Coupling Spatial Multiattribute Analysis and Optimization to Identify Reforestation Priority Areas / G.M. Cruz-Bello, E.D. Sotelo-Ruiz // Mountain Research and Development. – 2013. – Vol. 33, 1 – P. 29–33.
- Esperiencia del estudio geoestadístico de composición química de suelos, de los indicadores de factores y de las condiciones geoquímicas:

report de Recerca / Head J.A. Martín-Fernández. – IMA 04-01-RR. – Girona : Universitat de Girona, 2004. – 50 p.

20. Kim D. Identification and Visualization of Complex Spatial Pattern of Coastal Dune Soil Properties Using GIS-Based Terrain Analysis and Geostatistics / D. Kim, K. Bae Yu, P.S. Jin // Journal of Coastal Research. – 2008. – P. 50–60.

21. Miroshnychenko M. Monitoring of urban soil contamination under various technogenic impact: Comparison of the two seaside cities / M. Miroshnychenko, I. Krivitska, Y. Hladkikh // Geophysical Research Abstracts. – Vol. 19, EGU2017. – 2007. – P. 323.

22. Pawlowsky-Glahn V. Geostatistical Analysis of Compositional Data / V. Pawlowsky-Glahn, R.A. Olea. – Oxford: Oxford University Press, 2004. – 304 p.

23. Technogenic soils of Poland / Edited by P. Charzyński, P. Hulisz, R. Bednarek // Polish Society of soil science. – Toruń, 2013. – 358 p.

24. Tyutyunnik Yu. Electrical Resistivity of genetic soil horizons / Yu. Tyutyunnik, O. Shabatura // Eurasian Soil Sciences. – 2004. – Vol. 37, № 2. – P. 177–180.

#### References

- Belozertseva, I.A., Lopatina, D.N. (2015). Technogenic impact on soils of the urbanized territories of Siberia. *Fundamental research. Geographical sciences*, 2, 5397–5403. [In Russian].
- Buzina, I.M. (2012) Studies of soil in terms of technogenesis condition. *Proceedings ZhNAEU*, 2, 1, 232–241. (<http://ir.znau.edu.ua/handle/123456789/298>). [In Ukrainian].
- Voysitovska, A.S., Karabyn, V.V., Pohrebennyk, V.D. (2013). Distribution of different forms of mobility zinc in soils in the area of technogenic dumps. *Proceedings of DonNTU. Series "Mining and Geology"*, 19 (209), 3–9. [In Ukrainian].
- Voysitsky, A.P., Dubrovsky, V.P., Bogolyubov, V.M, Ed. Bogolyubov, V.M. (2009). *Technoecology*. K: Agricultural Education, 533 p. [In Ukrainian].
- Krasilinikov, P.V. (Ed.) (2007). *Geostatistics and geography of soils*. M. : Science, 175 p. [In Russian].
- Saet, Yu.E., Revych, B.A., Yanyin, E.P. et al. (1990). *Environmental geochemistry*. M. : Depths, 335 p. [In Russian].
- Izyumova, O.G. (2013) Water-physical properties of soil technogenesis. *Agroecological Journal*, 3, 29–35. [In Ukrainian].
- Kotovenko, A.A., Miroshnichenko, O.Yu., Bereznytska, Y.O., Shostal Yu.V. (2014). Probabilistic Automaton Modeling in studies of migration processes in soils. *East Europe Journal Advanced Technology*, 4/10 (70), 37–43. [In Ukrainian].
- Jovanovic, L., Ermakov, V. (2010). Influence of the technogenesis upon biosphere (for example of mercury and selenium). *Scientific Labor Rusenskyya at University*, 49, 1.2, 114–119. [In Russian].
- Kabata-Pendyas, A., Pendyas, H. (1989). *Microelements in soils and plants*: M.World, 426 p. [In Russian].
- Karabyn, V.V., Voysitovska, A.S., Pohrebennyk, V.D. (2012). The forms of copper bedding in dump soils of the man-caused area. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seria: Himycholeoholichna*, 16 (206), 193–198. [In Ukrainian].
- Nazarenko, I.I., Polchyna, S.M., Nikorych, V.A. (2004). *Soil*. Chernivtsi: Books – XXI, 400 p. [In Ukrainian].
- Stepanova, L.P., Korenkova, E.A. (2010). The influence of technogenesis on the geochemistry and ecological capacity of the landscape. *Orel: Publishing house Ore. SAU*, 260 p. [In Russian].
- Tyutyunnik, Yu.H., Onyshchuk, I.I., Shabatura, A.V. (2004). Electrical resistivity of genetic soil horizons. *Soil Science*, 2, 209–213. [In Russian].
- Tyutyunnik, Yu.H., Tolstoy, M.I., Shabatura, O.V. (2003). Mathmodeling of migration and accumulation of  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Sr}$  in soils of Irpin-Bucha-Vorzel recreation zone. *Abstract of IV International science conference "Monitoring dangerous geologic processes and ecological state of environmental"*. K.:Kiev University, 101–102. [In Ukrainian].
- Aitchison, J., Greenacre, M. (2002). Biplot of compositional data. *Applied Statistics*, 5, 375–392.
- Cadenasso, M.L., Pickett, S.T.A., Weathers, K.C. et al. (2003). An Interdisciplinary and Synthetic Approach to Ecological Boundaries. *BioScience*, 53, 8, 717–722. (doi: 10.1641/0006-3568(2003)053[0717:AIASAT]2.0.CO;2).
- Cruz-Bello, G.M., Sotelo-Ruiz, E.D. (2013). Coupling Spatial Multiattribute Analysis and Optimization to Identify Reforestation Priority Areas. *Mountain Research and Development*, 33, 1, 29–33. (doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00085.1).
- Martín-Fernández, J.A., Daunis-i-Estadella, J., Tyutyunnik, Y.G. (2004). Esperiencia del estudio geoestadístico de composición química de suelos, de los indicadores de factores y de las condiciones geoquímicas: Report de Recerca IMA 04-01-RR.Girona: Universitat de Girona, 50 p.
- Kim, D., Bae, Yu. K., Jin, P.S. (2008) Identification and Visualization of Complex Spatial Pattern of Coastal Dune Soil Properties Using GIS-Based Terrain Analysis and Geostatistics. *Journal of Coastal Research*, 50–60. (doi: 10.2112/06-0721.1).
- Miroshnychenko, M., Krivitska, I., Hladkikh, Y. (2017). Monitoring of urban soil contamination under various technogenic impact: Comparison of the two seaside cities. *Geophysical Research Abstracts*, 19, EGU2017, 323.
- Pawlowsky-Glahn, V., Olea, R. A. (2004). *Geostatistical Analysis of Compositional Data*. Oxford: Oxford University Press, 304 p.
- Charzyński, P. (ed.), Hulisz, P., Bednarek, R. (2013). *Technogenic soils of Poland*. *Polish Society of soil science*. Toruń, 358 p.
- Tyutyunnik, Yu., Shabatura, O. (2004). *Electrical Resistivity of genetic soil horizons*. *Eurasian Soil Sciences*, 37, 2, 177–180.

Yu. Tyutyunnik, Dr.Sci (Geograf.), Prof., Leading Researcher  
E-mail: carme1@mail.ru  
Institute for Evolutionary Ecology NAS Ukraine, Department of Dendrology and Park Learning  
37, Lebedeva Str., Kiev, 03143, Ukraine,  
O. Shabatura, Cand.Sci (Geol.), Senior Researcher  
E-mail: sand@univ.kiev.ua  
Taras Shevchenko National University of Kyiv  
Institute of Geology, 90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine,  
J. Daunis-i-Estadella, Dr., Assoc. Prof.  
E-mail: pepus.daunis@udg.edu  
University of Girona, Department of informatics, applied mathematics nah mathstatistics  
Campus Montelivi, E-17071a, Girona, Spain

## GEOSTATISTICAL STUDY OF LATERAL AND RADIAL DISTRIBUTION OF CONCENTRATIONS OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE SOIL OF MODERATE TECHNOGENESIS ZONE (on example of Kyiv suburbia)

Average concentrations of chemical elements in the soil depends on the action of natural and technogenic factors and are characterized by different regularities of migration and accumulation in the lateral and radial directions. Study of concentrations of chemical elements in soils of different elementary geochemical landscapes makes it possible to identify some of the important statistically significant regularities of distribution of chemical elements on the territory of Irpin-Bucha-Vorzela of Kyiv suburban area. The analysis of 190 samples from 36 full-profile soil profiles formed the basis of compositional data (CoDa). CoDa is vector product of the measured values of concentrations of chemical elements in each sample of soil. Geostatistical model biplot of CoDa is a hyperspace of geochemical factors and reasons with dimension corresponding to the amount determined in samples of chemical elements. Projection of hyperspace on the plane with "star" biplot especially together with projection of sampling points can demonstrate the probabilities of indicators of action of various geochemical factors and causes that occur in the study area. Clustering of sampling points occurs in a possible impact of certain factors on the group geochemical samples. The geostatistical parameters obtained by modeling SoDa in La-Ce-Nd 12-dimensional and Fe-Sr-Ga 9-dimensional hyperspaces mark an area of geochemical factor "influence of initial mineral composition of rocks". The area is defined by relevant geostatistical parameters Rb-Sr-Ba in 12-dimensional and Ba-R in 9-dimensional hyperspaces statistically "linked" to the acid-alkaline conditions in soils. Manganese area in the mentioned above area and 6-dimensional hyperspace of Fe mark the oxidation-reduction conditions in soils. Area of Pb suggests to determine a pyrogenic component of technogenic influence associated with vehicle emissions. Zn-Cu area is associated with impact of biogenic processes. Relative impact geochemical factors on the elemental composition of the upper (10 cm) layer of soil geochemical factors surveyed area are ranged in row: technogenesis > biogenesis > effect of initial lithogenic basis. The analysis of 6-dimensional hyperspace gave general trend to group between areas that are marked Fe-Sr-Ba-Rb (lithological and mineralogical factor) and Pb (technogenesis, especially atmospheric pollution caused by road). For soil sampling points of the subordinate landscapes there is a tendency to highlight grouped areas marked Fe-Sr-Ba-Rb, Zn and Pb. Geochemical factors and reasons most clearly effect in the analysis SoDa samples taken with reference to the genetic soil horizons than those selected from formal deep layer.

Keywords: biplot, hyperspace geochemical factors and causes, compositional data, technogenesis, biogenesis, lithological and mineralogical factor.

Ю. Тютюнник, д-р геогр. наук, проф., вед. науч. сотр.  
E-mail: carme1@mail.ru  
Институт эволюционной экологии НАН Украины, Отдел дендрологии и парковедения  
ул. Акад. Лебедева, 37, г. Киев, 03143, Украина,  
А. Шабатура, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.  
E-mail: sand@univ.kiev.ua  
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина,  
Х. Даунис-и-Естаделья, д-р наук, доц.  
E-mail: pepus.daunis@udg.edu  
Университет Жироны, Отделение информатики, прикладной математики и математической статистики  
Кампус Монтеливи Е-17071а, г. Жирона, Испания

## ГЕОСТАТИСТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЛАТЕРАЛЬНОГО И РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВЕННОМ ПОКРОВЕ ЗОН УМЕРЕННОГО ТЕХНОГЕНЕЗА (на примере субурбии киевского мегаполиса)

Распределение концентраций химических элементов в почвенном покрове зависит от действия природных и техногенных факторов и характеризуется различными закономерностями миграции и накопления в латеральном и радиальном направлениях. Изучение концентраций химических элементов в почвах различных элементарных геохимических ландшафтов позволило определить важнейшие статистически-значимые закономерности распределения химических элементов на территории Ирпень-Буча-Ворзельской субурбии Киевского мегаполиса. Результаты анализа 190 проб из 36 полных почвенных профилей легли в основу базы составленных данных (СоДа-данные), полученных векторным произведением всех измеренных величин концентраций химических элементов в каждой пробе почвы. Геостатистическая модель "биplot" СоДа-данных представляет собой гиперпространство геохимических факторов и причин с размерностью, соответствующей количеству определенных в пробах химических элементов. Проекция этого гиперпространства на плоскость в виде "звезды" биplotа, с одновременным нанесением на плоскость проекции точек пробоотбора, дает возможность наглядно отслеживать вероятностные (статистические) показатели маркировки химическими элементами действия тех или иных геохимических факторов и причин, имеющих место на исследуемой территории. Кластеризация точек пробоотбора происходит в областях более вероятного воздействия на соответствующую группу проб геохимических факторов. Установлено, что геостатистическими параметрами, полученными при моделировании СоДа-данных по содержанию в почвах La-Ce-Nd в 12-мерном гиперпространстве и Fe-Sr-Ga – в 9-мерном, обозначается область в которой проявляется такой геохимический фактор, как "влияние выходящего минерального состава почвообразующей породы". Область определяемая параметрами Rb-Sr-Ba в 12-мерном гиперпространстве и Ba-Rb в 9-мерном, статистически "привязана" к кислотно-щелочным условиям почв. Область марганца в обоих гиперпространствах и железа в 6-мерном, маркирует окислительно-восстановительные условия почв. При этом Fe частично маркирует и кислотно-щелочные условия, с которыми связан показатель Eh. Область Pb маркирует техногенез, особенно его пирогенную составляющую, связанную с автотранспортными выбросами. Область Zn-Cu связана с действием и влиянием, в первую очередь, биогенных процессов гумусообразования, гумусо- и торфонакопления (биогенез). По силе относительного влияния на элементный состав верхнего (10 см) слоя почвы исследованной территории геохимические факторы располагаются в таком ряду: техногенез > биогенез > влияние исходной литогенной основы. При анализе модели 6-мерного гиперпространства выявлена общая тенденция для точек проб из автономных ландшафтов, а именно, группироваться между областями, которые маркируются Fe-Sr-Ba-Rb (литолого-минералогический фактор) и Pb (техногенез, прежде всего атмосферное загрязнение, вызванное автотранспортом). Для точек почвенного пробоотбора из подчиненных ландшафтов просматривается тенденция группироваться в областях, которые маркируются Fe-Sr-Ba-Rb и Zn (биогенез) – с одной стороны, и Zn и Pb – с другой. Геохимические факторы и причины отчетливее проявляют себя при анализе СоДа-данных проб, отобранных с привязкой к генетическим грунтовым горизонтам, чем тех, которые были отобраны с привязкой к глубинам отбора пробы - чисто формального признака.

Ключевые слова: биplot, гиперпространство геохимических факторов и причин, составленные данные, техногенез, биогенез, литолого-минералогический фактор.

УДК 55:51

І. Долинський, інж.-програміст II кат., відділ інформ. технологій  
E-mail: idolinskiy@ukr.net  
ДНВП "Геоінформ України"  
вул. Ежена Потье, 16, м. Київ, 03680, Україна

## ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ ЕКСПЕРТНО-МОДЕЛЮЮЧИЙ КОМПЛЕКС ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ В ГЕОЛОГІЇ

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

Сучасні дослідження в галузі геології на базі засобів моделювання найчастіше закінчуються побудовою тривимірної геологічної моделі, яка, у свою чергу, є основою для прийняття технологічних і фінансових рішень при оцінюванні якості та перспективності родовищ і копалин. У геології зазвичай існують два узагальнені типи геологічних моделей. Моделі локальних об'єктів, для яких існує щільна інформаційна сітка з наявними даними для їхньої побудови, та моделі регіональні, для яких вхідна інформація рідка та нерівномірно розподілена. Регіональні об'єкти можливо будувати на основі локальних об'єктів і додатково формувати відсутність в проміжках геолого-геофізичну інформацію різними методами.

Проблему побудови моделей локальних об'єктів можна вважати вирішеною, оскільки існує достатня кількість програмних продуктів для побудови та проведення досліджень з ними (Petrel Schlemberger, Geographix Landmark та ін.). Питання ж побудови регіональних геологічних моделей залишається поки відкритим, тому проблему методик їхнього створення та оцінювання слід вважати актуальною. Під регіональною геологічною моделлю в статті розуміємо цифрову модель великої геологічної структури, до якої входять локальні об'єкти, які є її складовими частинами, що утворюють структури вищих порядків. Для побудови цифрових моделей регіональних об'єктів автором пропонуються спеціальні програмні компоненти, які було вбудовано в існуючі промислові геологічні засоби моделювання, що дало змогу проводити якісне оцінювання вихідних моделей.

Представлено функціональні можливості геоінформаційного експертно-моделюючого комплексу (ГЕМК), який забезпечує створення моделей регіональних об'єктів, їхнє зберігання, оброблення та візуалізацію наявної в них геолого-геофізичної інформації для проведення просторового аналізу та оцінювання якості моделей. Запропоновані підходи забезпечили можливість програмно реалізувати зручний для користувача програмний комплекс побудови та аналізу регіональних геологічних об'єктів. Картографічний інтерфейс системи використовує загальноприйнятту геологічну термінологію і орієнтований на фахівця геолога-геофізика. Система випробувана на реальному геологічному матеріалі.

ГЕМК реалізований у вигляді геоінформаційної системи із вбудованими засобами моделювання регіональних геологічних моделей. Комплекс складається із трьох програмних складових, розроблених у різних середовищах та інтегрованих у проект ArcView за допомогою DLL-технології. У функціональному відношенні розглянуті програмні складові даного комплексу реалізують можливості: 1) побудови 2D моделей геологічних границь, літологічних і емісіо-фільтраційних параметрів з урахуванням повного комплексу вихідної та апріорної інформації на базі стандартних засобів Geotarring; 2) моделювання 3D візуалізації побудованих моделей; 3) проведення просторового аналізу моделей з метою вироблення та прийняття інженерних рішень щодо ефективності оцінюваних районів, для яких побудовано регіональні моделі. Відповідне програмне забезпечення створено на базі доступної промислової ГІС ArcView 3.1 з використанням вбудованих програмних елементів, які реалізують спеціалізовані методики моделювання та оцінювання геологічних об'єктів.

Випробування системи проводилося на геологічних об'єктах головної нафтогазоносною провінції України – Дніпровсько-Донецької западини.

**Ключові слова:** геоінформаційна система, регіональні моделі нафтогазової геології, технологічні схеми побудови моделей, експертно-моделююча система.

Сучасні геологічні моделювання найчастіше закінчуються побудовою тривимірної геологічної моделі, яка, у свою чергу, є основою для прийняття технологічних і фінансових рішень [1, 2].

У геології зазвичай використовуються два узагальнені типи геологічних моделей. Моделі локальних об'єктів, для яких існує щільна інформаційна сітка з геолого-геофізичними даними, та моделі регіональні, в яких вхідна інформація рідка та нерівномірно розподілена. Моделі регіональних об'єктів складаються з моделей локальних об'єктів і полів між ними з практично повною відсутністю геолого-геофізичної інформації.

Побудова моделей регіональних об'єктів потребує використання сукупності спеціалізованих методів знаходження відсутніх даних, їхньої візуалізації та аналізу з метою оцінювання властивостей об'єкта на наявність того чи іншого показника, який характеризує якість регіональних об'єктів, що розглядаються в режимі реального часу. Реалізація цих методів забезпечується окремими техніками представлення та обробки даних, а також засобами вироблення та отримання логічних висновків із процедур оцінювання різних наборів даних і прийняття рішень на основі експертних знань.

**Формулювання проблеми.** Для побудови цифрових моделей регіональних об'єктів потрібно розроблення спеціалізованих методик і створення засобів виконання аналітичних операцій з ними на базі спеціалізованих програм, які б ліквідували недостатність вихідної інформації та забезпечували побудову адекватних моделей.

Проведення досліджень з оцінювання властивостей районів розвідки в галузі геології потребує створення гібридного експертно-моделюючого комплексу, який містить геоінформаційну систему (ГІС) як елемент надання користувачам засобів візуалізації та знаходження апріорних даних; експертно-аналітичну систему (ЕАС), яка реалізує надання користувачам засобів оцінювання розроблених моделей та інформаційно-технологічну систему (ІТС), що виконує збереження даних при проведенні досліджень.

**Актуальність.** Наявність баз даних геолого-геофізичної інформації та сучасне програмне забезпечення для побудови геологічних моделей дозволяють вирішувати задачі пошуку ефективних родовищ корисних копалин. Поширення та розвиток функціональних можливостей цього напрямку потребує побудови геоінформаційного експертно-моделюючого комплексу, який інтегрує властивості ГІС та експертних систем. Розроблений комплекс має реалізувати методику побудови регіональних геологічних моделей, забезпечити користувача набором технологічних засобів дослідження їхніх властивостей і являє собою актуальну науково-практичну задачу.

**Огляд існуючих підходів.** Рішення щодо створення подібних програмних систем було запропоновано у вигляді просторових систем підтримки прийняття рішень (ПСППР) [7].

Існуючі моделі геологічних об'єктів у більшості випадків будуються з використанням двовимірної графіки та оцифрованих наборів їхніх характеристик. Для задач геологічного дослідження прийнято використовувати моделі, побудовані за даними свердловин, сейсморозвідки,

георадарів тощо. Актуальними є будь-які засоби комп'ютерного моделювання, що надають можливості спрощення, прискорення та зниження затрат на проведення певних досліджень геологічних об'єктів.

У роботі [4] обґрунтовується положення про те, що регіональну модель шаруватого геологічного тіла можна описати множиною 2D моделей геологічних границь і геолого-геофізичних параметрів тіл, які вони обмежують. На базі цього підходу пропонується методика побудови

моделей регіональних геологічних об'єктів для певних районів спостереження та засоби їхнього тривимірного просторового аналізу.

**Концепції інтеграції ГІС та ЕС.** На основі роботи [6], в якій представлено характеристики експертно-аналітичних і геоінформаційних систем для створення гібридного експертно-моделюючого комплексу, виявлено та формалізовано концептуальні відмінності двох можливих підходів (табл. 1).

Таблиця 1. Концептуальні відмінності ГІС та ЕС

№	Характеристична ознака	ГІС	ЕС
1	Наявність структурованості предметної області	Закладена формалізмом	Не обов'язкова
2	Базові примітиви формалізму	Геометричні	Символьні
3	Типи інформації в системі	Дані	Знання
4	Обробка неповних даних	Обмежена	Закладена формалізмом
5	Масштабованість	Закладена формалізмом	Ускладнена
6	Наявність функції пояснення	Відсутня	Закладена формалізмом
7	Можливість логічного виведення	Відсутня	Закладена формалізмом
8	Функціонал обробки просторових (географічних і геометричних) даних	Закладений формалізмом	Відсутній
9	Виконання геометричних операцій	Закладено формалізмом	Відсутнє

Зазначені відмінності можливо мінімізувати, інтегруючи найбільш привабливі та відкидаючи слабкі характеристики двох підходів. Перший підхід реалізує інтеграцію ГІС-компоненти з механізмом логічного виведення в експертних системах. Зазвичай подібний підхід використовують для вдосконалення засобів візуалізації в ЕС можливостями представлення та обробки просторової інформації. Другий підхід, навпаки, передбачає розширення можливостей ГІС-механізмами логічного виведення з ЕС. Саме другий підхід – створення інтелектуальних ГІС, найбільш відповідає вимогам створення ГЕМК, у першу чергу тому, що на геолого-розвідальних підприємствах уже існують деякі методики та техніки оцінювання

властивостей геологічних моделей у вигляді геоінформаційних рішень. Крім цього, ГІС-компоненти достатньо просто масштабуються та поповнюються.

**Опис функціональних компонентів ГЕМК.** ГЕМК складається з геоінформаційної, інформаційно-технологічної та експертно-аналітичної компонент (рис. 1).

Кожна з наведених компонент, у свою чергу, будується на основі об'єктів (програмних модулів), що формуються сценарними програмами створення покрокових елементів для системи моделювання та процедур аналізу регіональних об'єктів.

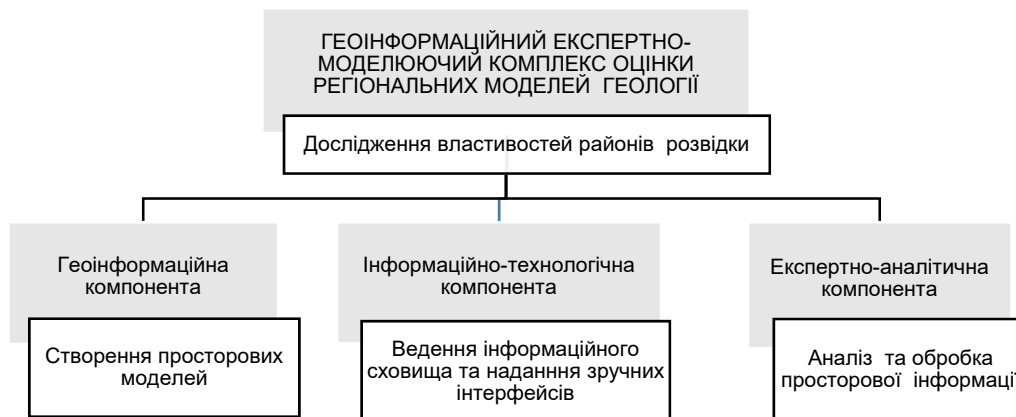


Рис. 1. Компоненти геоінформаційного експертно-моделюючого комплексу та групи задач, що вирішуються з його допомогою

Розглянемо типові функціональні можливості кожної з наведених компонент. ГІС-компонента дозволяє відбирати вихідні дані для побудови просторових моделей регіональних об'єктів, зберігати та візуалізувати їх. ІТС-компонента має засоби організації та ведення баз даних об'єктів дослідження, бібліотеки процедур компенсації відсутніх даних і формування згущених даних на віртуальних поверхневих каркасах. ЕС-компонента будує моделі регіональних об'єктів, виконуючи сценарій побудови моделі за принципом пошарового 3D-виращування віртуального об'єкта і дозволяє проводити їхній аналіз, виконуючи процедури ідентифікації отриманих поверхонь і

кубів, а також вирішує задачу класифікації побудованих 3D-моделей регіональних об'єктів.

**Методика побудови регіональних моделей геологічних об'єктів.** Моделювання геологічного об'єкта має здійснюватися на будь-якій стадії дослідження і відповідно на будь-якому інформаційному рівні. Залежно від наявних вихідних даних для побудови моделі використовується той чи інший математичний підхід. За наявності природних аналогів використовується сплайн-апроксимація [1]. Якщо природні аналоги відсутні, застосовується ітераційна сплайн-апроксимація із застосуванням техніки автоаналога [1, 4] або ітераційна лінійна інтерполяція на трикутних сітках [5] (рис. 2).

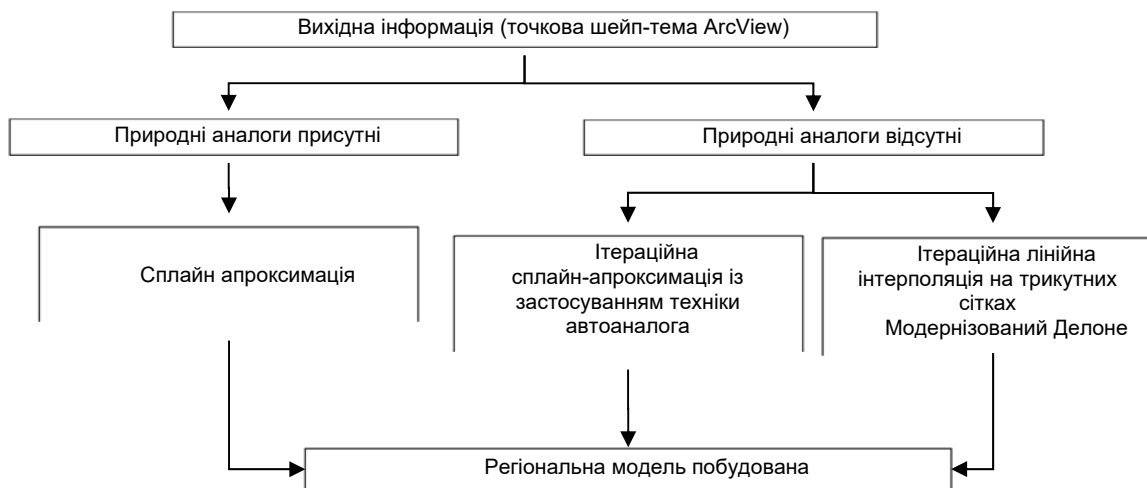


Рис. 2. Схема побудови регіональної геологічної моделі

**Техніки створення інтегрованої моделі регіонального об'єкта.** Інтегрована цифрова модель геологічного об'єкта створюється на будь-якій стадії дослідження об'єкта і відповідно спираючись на наявний обсяг даних. Основою створення інтегрованої цифрової моделі регіонального геологічного об'єкта є побудова 2D-моделі геологічної границі та визначення геологічних ознак для поверхні, що формується. Задача побудови 2D-моделі геологічної границі, в умовах достатніх і рівномірно розподілених на площині дослідження вихідних даних, розв'язується тривіальною інтерполяцією. Однак отримати таку модель в умовах недостатніх або нерівномірно розподілених на площині дослідження вихідних даних, є ускладненою задачею, що потребує зв'язаних процедур знаходження відсутніх даних із різних джерел, а саме – апріорної інформації з оцифрованих карт в ізолініях, цифрових моделей розрізів – гридів, побудованих попередниками.

Побудова структурних і ємнісно-фільтраційних параметрів моделей має здійснюватися з урахуванням бага-

тьох параметрів, наприклад таких як: визначення тектонічних порушень, наявність соляних штоків, значень відповідних параметрів, отриманих у свердловинах, із сейсморозвідувальних профілів, оцифрованих карт і формуватися у вигляді кластера з певним набором характеристик.

Для побудови кластера регіональної моделі пропонується використовувати програмний комплекс GEOMAPPING [1], який дозволяє виконати більшість з означених процедур і вже має приклади використання цих процедур на великій кількості геологічних об'єктів.

На рис. 3 показано приклад роботи комплексу на одному з регіональних геологічних об'єктів. Для цього прикладу вихідна інформація представлена картою геологічної границі в ізолініях (на рисунку зверху). Рисунок знизу демонструє результат виконання ряду процедур в середовищі GEOMAPPING з отримання інтегрованої цифрової моделі для цієї границі. Як бачимо, одержана модель майже повністю збігається за характеристиками з вихідною інформацією про об'єкт.

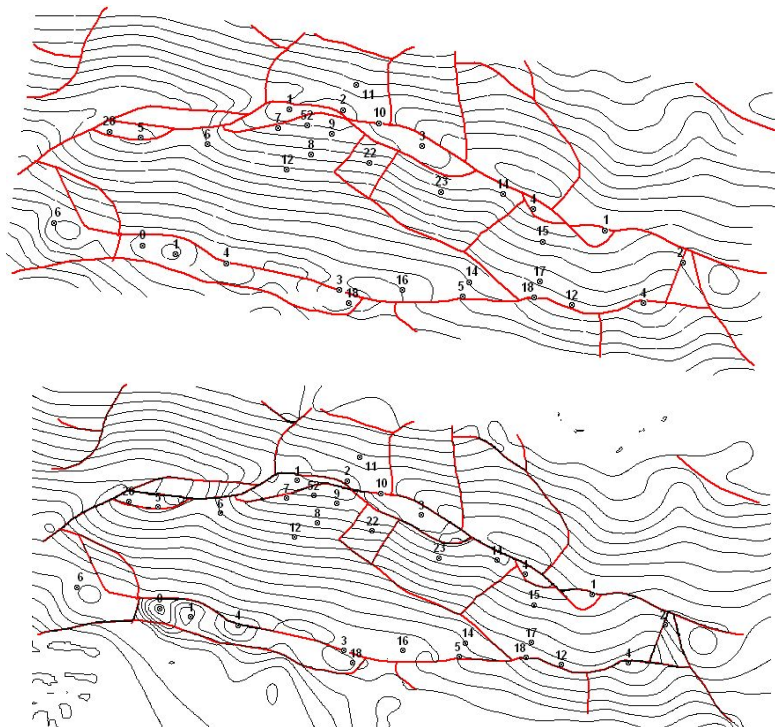


Рис. 3. Приклад моделювання регіональної геологічної границі



За відсутності природної апріорної інформації про об'єкт та з урахуванням проблеми нерівномірного розподілу і рідкої мережі точок спостереження модель будується спеціальними методами. Для згущення даних у мережі точок побудови моделі було використано метод ітераційної сплайн-апроксимації із застосуванням техніки автоаналога. Сутність методу така. На  $i$ -му кроці засобами GEOMAPPING будується поверхня з високим ступенем згладжування. На  $(i + 1)$ -му кроці ця поверхня використовується як аналог, а результуюча поверхня будується з меншим ступенем згладжування і схожістю на аналог. Такий підхід дозволяє значно збільшити інформаційну насиченість вихідної інформації для визначення відсутніх у додаткових точках значень параметрів геологічного об'єкта, що досліджується.

Другий метод збільшення інформаційної насиченості в умовах рідкої мережі даних спостереження є лінійна інтерполяція на триангульованій області. При цьому традицій-

ний варіант процесу додавання точок методом лінійної інтерполяції на триангульованій трикутній області вдосконалено за рахунок ітераційного процесу створення додаткових серединних точок на сторонах трикутників, що будуються, довгих за задану порогову величину відхилення від середнього значення параметра в точках при вершинах. Вибір саме цього підходу обґрунтовується тим, що на ділянках між точками спостереження шукана поверхня апроксимується площинами (поверхнями) з мінімальною кривизною, побудова яких потребує найменших ресурсів. Крім цього, запропонований підхід не залежить від порядку розбиття розрідженої області на трикутники.

**Засоби просторового аналізу та візуалізації моделей.** Методи парної просторової кореляції та парна просторова регресія 2D-моделей параметрів (регресійні залежності будуються в областях високої кореляції) дозволяють з високим ступенем подібності будувати проміжні шари для формування 3D-моделей. Результати використання цього підходу демонструються на рис. 4.

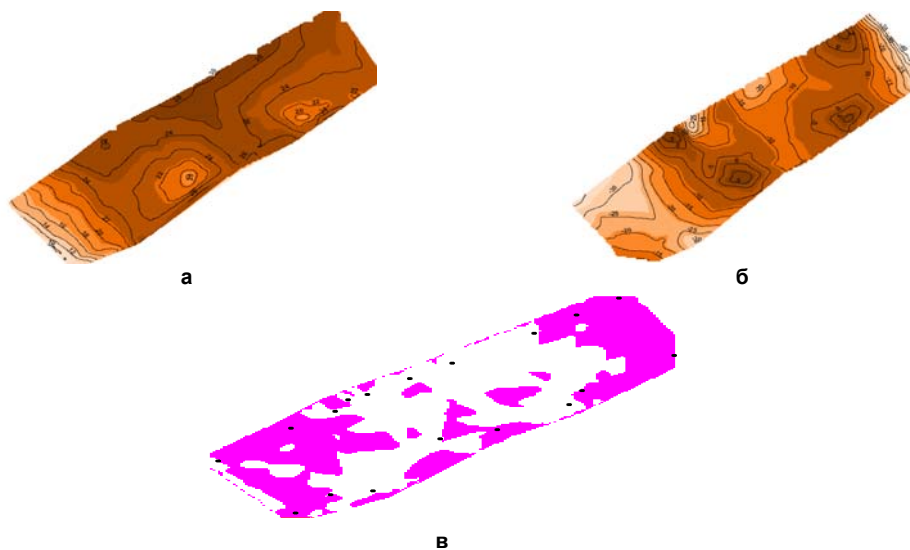


Рис. 4. Карта парної просторової кореляції між покрівлею (а) і підшовою (б) геологічного тіла. (Фіолетовий колір (в) відповідає ділянкам високої кореляції)

Методи просторової кластеризації (виділення в геологічному тілі об'єктів, однорідних у просторі параметрів, що розглядаються) та просторової класифікації (виділення в геологічному тілі об'єктів із заданими властивостями) виконуються компонентами ЕС при прогнозуванні ділянок, перспективних на нафту та газ.

Поведінку створених для цих цілей алгоритмів було апробовано на даних бурових і сейсморозвідувальних робіт у межах Срібненської западини, розташованої в зоні Центрального грабена Дніпровсько-Донецької западини. Приклади отриманих за результатами цих обчислень карт наведені на рис. 5.

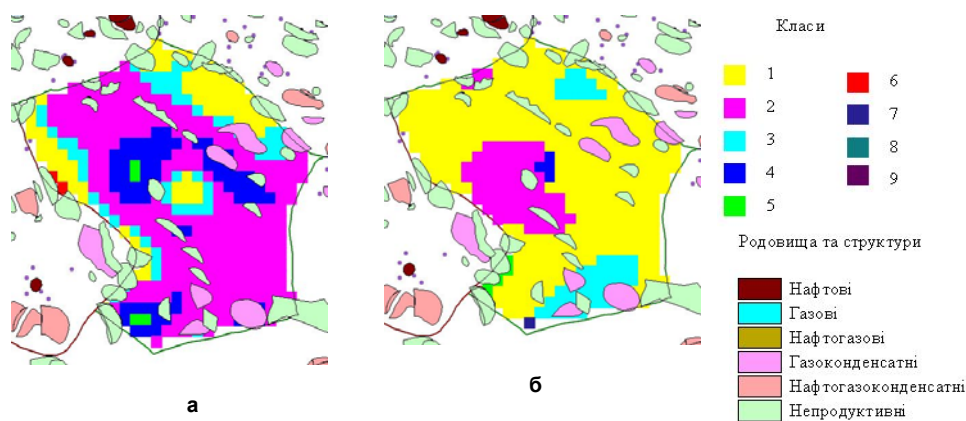


Рис. 5. Результати кластеризації: а – "по відстані"; б – "по куту"

У результаті кластеризації "по відстані" (рис. 5, а) всі родовища потрапляють у кластери 2, 4, які лежать на поверхні структурного тренду і характеризуються великими глибинами і максимальними температурами прогріву продуктивних відкладів. Сучасний градієнт температури в межах об'єкта приблизно однаковий. Тобто родовища тяжіють до локальних підняття в найглибших частинах об'єкта.

Результати кластеризації "по куту" (рис. 5, б) демонструють зв'язок родовищ із кластерами 1, 3 – з такими ж, як і в попередньому випадку характеристиками факторів. Роздільна здатність кластеризації за цим методом гірша порівняно з кластеризацією "по відстані", однак вона є додатковим підтвердженням висновків про наявність нафтоносних пластів у районі дослідження.

**Висновки.** Наведені у статті матеріали розкривають функціональні можливості геоінформаційного експертно-моделюючого комплексу для побудови та аналізу моделей регіональних геологічних об'єктів. Комплекс програмно реалізований у вигляді геоінформаційної системи в середовищі ArcView 3.п. та набору вбудованих до нього процедур оцінювання ефективності районів обстеження. Картографічний інтерфейс системи використовує загальноприйняту геологічну термінологію та орієнтований на фахівця геолога-геофізика. Система випробувана на реальному геологічному матеріалі й знайшла схвальний відгук серед геологів.

#### Список використаних джерел

1. Гребенніков С.Є. Геолого-математичне моделювання і географічні інформаційні системи в задачі моніторингу седиментаційних басейнів / С.Є. Гребенніков, О.П. Лобасов // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2001. – Вип. 19. – С. 28–31.
2. Демерс М.Н. Географические информационные системы. Основы / М.Н. Демерс. – М., 2006. – 246 с.

I. Dolynskiy, Software engineer II cat.  
E-mail: idolinskiy@ukr.net  
SSPE "Geoinform of Ukraine"  
16 Ezhena Pottier Str., Kyiv, 03680, Ukraine

### ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ ЕКСПЕРТ-МОДЕЛЮЮЧИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ У ГЕОЛОГІЧНОМУ АСПЕКТІ

*Modern studies in the field of geology on the basis of modeling tools necessarily end with the construction of a three-dimensional geological model, which, in turn, is the basis for making technological and financial decisions in assessing the quality and prospects of deposits and mines. In geology, there are usually two generalized types of geological models. Models of local objects, for which there is a dense information grid with available data for their construction, and regional models in which the input information is liquid and unevenly distributed. Regional objects can be built from local objects and additionally form lacking geological and geophysical information through various methods.*

*The problem of constructing models of local objects can be considered solved, because there is a sufficient number of software products for constructing and conducting research with them (Petrel Schlemberger, Geographix Landmark, etc.). The question of constructing regional geological models remains open and the problem of creating methodologies for their creation and evaluation should be considered relevant. The regional geological model refers to the digital model of a large geological structure, which includes local objects, which are its constituent parts and represent structures of higher orders. The author proposes special software components for constructing digital models of regional objects, which are simply embedded in existing industrial geological modeling tools, and will take into account such a distribution of source information and constructed models that enable them to perform qualitative evaluation.*

*The article presents the functional capabilities of the geoinformation expert-modeling complex (GEMK), which provides: creation of models of regional objects, their storage, processing and visualization of geological and geophysical information available to them for spatial analysis and evaluation of model quality. The offered approaches provided an opportunity to programmatically implement a user-friendly software complex for the construction and analysis of regional geological objects. The cartographic interface of the system uses common geological terminology and is oriented to a specialist geologist-geophysicist. The system is tested on real geological material.*

*GEMK is implemented in the form of a geographic information system with built-in means of simulation of regional geological models of geology. The complex consists of three software components developed in various development environments and integrated into the ArcView project using DLL technology. In functional terms, the considered program components of this complex realize the possibilities: 1) the construction of 2D models of geological boundaries, lithological and capacitive filtration parameters, taking into account the full complex of source and a priori information on the basis of standard Geomapping tools; 2) simulation of 3D visualization of the constructed models; 3) spatial analysis of models for the purpose of developing and adopting engineering solutions for the effectiveness of the assessed areas for which regional models are built. The corresponding software was created on the basis of available and industrial GIS ArcView 3.n using built-in software elements that implement specialized modeling and evaluation techniques for geological objects.*

*The system was tested on the geological sites of the main oil and gas province of Ukraine - the Dnipro-Donets depression.*

**Keywords:** expert-modeling system, geoinformational system, regional models oil and gas geology, technological schemes of constructing models.

3. Долинський І.П. Математичне і технологічне забезпечення 3D геологічного моделювання в ГІС середовищі / І.П. Долинський, О.П. Лобасов // Геоінформатика. – 2013 – № 1. – С. 49–53.

4. Долинський І.П. Засоби 3D візуалізації регіональних структурно-літологічних моделей нафтогазової геології / І.П. Долинський, О.П. Лобасов // Мінеральні ресурси України. – 2012. – № 2. – С. 20–22.

5. Долинський І.П. Лінійна інтерполяція на триангульованій області як метод побудови 2D моделей параметрів за відсутності апріорної інформації / І.П. Долинський, О.П. Лобасов, В.М. Огарков // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики : зб. наук. праць. – 2015. – Вип. 12. – С. 95–102.

6. Eldrandaly K.A.M.S. Expert Systems, GIS, And Spatial Decision Making: Current Practices And New Trends [Electronic Resource] / K.A.M.S. Eldrandaly // Expert Systems Research Trends – 2007 – P. 207–228. – Access mode: <http://www.publications.zu.edu.eg/Pages/PubShow.aspx?ID=13314&pubID=18>

7. Sugumarar, R. Spatial Decision Support Systems: Principles and Practices / R. Sugumarar, J. Degroote. – CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 2010. – 510 p.

#### References

1. Hrebennikov, S.Ye., Lobasov, O.P. (2001). The Geological-mathematical modeling and geographic information systems in a task of monitoring sedimentation basins. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 19, 28–31. [In Ukrainian].

2. Demers, M.N. (2006). *Geographic Information Systems. Basics*. M., 246 p. [In Russian].

3. Dolynskyy, I.P., Lobasov, O.P. (2013). Mathematical and technological provision of 3D geological modelling in gis environment. *Geoinformatics*, 1, 49–53. [In Ukrainian].

4. Dolynskyy, I.P., Lobasov, O.P. (2012). The 3D visualization of regional structural and lithologic patterns of petroleum Geology. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 20–22. [In Ukrainian].

5. Dolynskyy, I.P., Lobasov, O.P., Oharkov, V.M. (2015). The linear interpolation on triangulated region as a method of 2d parameters modelling in the case of a priori information absence. *Theoretical and practical aspects of Geoinformatics: Scientific proceedings*, 12, 95–102. [In Ukrainian].

6. Eldrandaly, K.A.M.S. (2007). Expert Systems, GIS, And Spatial Decision Making: Current Practices And New Trends. *Expert Systems Research Trends*, 207–228. URL: <http://www.publications.zu.edu.eg/Pages/PubShow.aspx?ID=13314&pubID=18>

7. Sugumarar, R., Degroote, J. (2010). *Spatial Decision Support Systems: Principles and Practices*. CRC Press. Inc. Boca Raton. FL, USA, 510 p.

Надійшла до редколегії 17.08.17

И. Долинский, инж.-программист II кат.  
E-mail: idolinskiy@ukr.net  
ГНПП "Геоинформ Украины"  
ул. Эжена Потье, 16, г. Киев, 03680, Украина

### ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРТНО-МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В ГЕОЛОГИИ

Современные исследования в области геологии на базе средств моделирования чаще всего заканчиваются построением трехмерной геологической модели, которая в свою очередь является основой для принятия технологических и финансовых решений при оценке качества и перспективности месторождений и рудников. В геологии обычно используется два обобщенных типа геологических моделей. Модели локальных объектов, для которых существует плотная информационная сеть имеющихся данных, и модели региональные, в которых входная информация редкая и неравномерно распределена. Региональные объекты возможно строить на основе локальных объектов и дополнительно формировать отсутствующую в промежутках геолого-геофизическую информацию различными способами.

Проблему построения моделей локальных объектов можно считать решенной, так как существует достаточное количество программных продуктов для построения и проведения исследований с ними (Petrel Schlemberger, Geographix Landmark и др.). Вопрос же построения региональных геологических моделей остается пока открытым, а проблему разработки методик их создания и оценки следует считать актуальной. Под региональной геологической моделью в статье понимается цифровая модель большой геологической структуры, которая включает локальные объекты, являющиеся ее составными частями и представляющие структуры высших порядков. Для построения цифровых моделей региональных объектов автором предлагаются специальные программные компоненты, которые встраиваются в существующие промышленные геологические средства моделирования и позволяют строить модели на основе исходной информации и проводить качественное их оценивание.

Представлены функциональные возможности геоинформационного экспертно-моделирующего комплекса (ГЭМКО), который обеспечивает: создание моделей региональных объектов, их хранение, обработку и визуализацию имеющейся геолого-геофизической информации для проведения пространственного анализа и оценки качества моделей. Предложенные подходы обеспечили возможность программно реализовать удобный для пользователя программный комплекс построения и анализа региональных геологических объектов. Картографический интерфейс системы использует общепринятую геологическую терминологию и ориентирован на специалиста геолога-геофизика. Система опробована на реальном геологическом материале.

ГЭМКО реализован в виде геоинформационной системы со встроенными средствами моделирования региональных геологических моделей. Комплекс состоит из трех программных составляющих, разработанных в различных средах разработки и интегрированных в проект ArcView с помощью DLL-технологии. В функциональном отношении рассмотрены программные составляющие данного комплекса реализуют возможности: 1) построения 2D-моделей геологических границ, литологических и емкостно-фильтрационных параметров с учетом полного комплекса исходной и априорной информации на базе стандартных средств Geotarring; 2) моделирование 3D визуализации построенных моделей; 3) проведение пространственного анализа моделей с целью выработки и принятия инженерных решений по эффективности оцениваемых районов, для которых построены региональные модели. Соответствующее программное обеспечение создано на базе доступной промышленной ГИС ArcView 3.п с использованием встроенных программных элементов, которые реализуют специализированные методики моделирования и оценки геологических объектов.

Испытания системы проводились на геологических объектах главной нефтегазосной провинции Украины – Днепроовско-Донецкой впадины.

Ключевые слова: экспертно-моделирующая система, геоинформационная система, региональные модели нефтегазовой геологии, технологические схемы построения моделей.

Наукове видання



## ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

### ГЕОЛОГІЯ

Випуск 4(79)

Комп'ютерна верстка та коректування О.О. Козіонова

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"

Responsibility for the opinions given, statements made, accuracy of the quotations, economical and statistical data, terminology, proper names and other information rests with the authors. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit the submitted materials. Manuscripts will not be returned.

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали. Рукописи та електронні носії не повертаються.



Формат 60x84<sup>1/8</sup>. Ум. друк. арк. 10,7. Наклад 300. Зам. № 217-8525.  
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл4.  
Підписано до друку 26.12.17

Видавець і виготовлювач  
Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"  
01601, Київ, б-р Т. Шевченка, 14, кімн. 43  
☎ (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.univ.kiev.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02