

Присвячується 75-річчю

**ННІ "Інститут геології"
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка**

DEDICATED TO THE 75TH ANNIVERSARY

**OF INSTITUTE OF GEOLOGY OF
Taras Shevchenko National
University of Kyiv**

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах даних Web of Science, Academic Resource Index 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 наукометрических базах данных Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib and 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, старш. наук. співроб. (заст. відп. ред.); О.І. Меньшов, д-р геол. наук (відп. секр.); В.Г. Бахмутов, д-р геол. наук, старш. 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.-мінералог. наук, проф.; В.І. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.; О.М. Іванік, д-р геол. наук, проф.; О.М. Карпенко, д-р геол. наук, проф.; М.М. Коржнев, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; І.М. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.; О.Є. Кошляков, д-р геол. наук, проф.; В.Г. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.; Б.П. Маслов, д-р фіз.-мат. 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, старш. 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, старш. наук. співроб.; В.В. Шевчук, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; С.Є. Шнюков, д-р геол. наук, доц.; Т.В. Пастушенко, канд. філол. наук, доц.; Т.А. Мірончук, канд. філол. наук, доц.

Іноземні члени редакційної колегії:

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; Г. Кулієв, Інститут геології та геофізики НАН Азербайджану; 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 Федеріко II, Італія; О. Ханчук, Далекосхідний геологічний інститут, Росія

Адреса редколегії

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

Затверджено

Вченою радою ННІ "Інститут геології"
12 березня 2019 року (протокол № 10)

Атестовано

Вищою атестаційною комісією України.
Постанова Президії ВАК України
№ 1-05/6 від 12.06.02

Зареєстровано

Міністерством юстиції України.
Свідоцтво про Державну реєстрацію КВ № 23534-13374 від 08.08.18

**Засновник
та видавець**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"
Свідоцтво внесено до Державного реєстру
ДК № 1103 від 31.10.02

Адреса видавця

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 і геоінформаційних досліджень.

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах 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 наукометрических базах данных Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib and Google Scholar.

Chief publication manager O. Menshov

EXECUTIVE EDITOR

EDITORIAL BOARD

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

Ukrainian Members:

I. Bezrodna, Cand. Sci. (Geol.), Senior Researcher (Deputy Executive Editor); O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), (Executive Secretary); V. Bakhmutov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher; S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; Z. Vyzhva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; Guliy, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Dubyna, Dr. Sci. (Geol.); V. Zagnitko, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; V. Zacerkovniy, Dr. Sci. (Tech.), Prof.; O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Karpenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; M. Korzhnev, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; I. Korchagin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; Prof.; V. Lozitsky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; B. Maslov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; 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.), Senior Researcher; V. Shevchuk, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; S. Shnyukov, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.; T. Pastushenko, Cand. Sci. (Phil.), Assoc. Prof.; T. Mironchuk, Cand. Sci. (Phil.), Assoc. Prof.

Foreign members:

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; H. Guliyev, Institute of Geology and Geophysics of ANAS, Azerbaijan; 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 Federico 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
March 12, 2019 (Minutes #10)

Certified by the

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

Certified by the

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

Founded and published by

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
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

Гулій В., Побережська І., Білик Н. Особливості розподілу та складу бетафіту з різноманітних формацій Алданського щита (Саха-Якутія)	9
Пушкарьов О., Руденко І., Зубко О., Долін В. (мол.) Активация азотною та гуміновими кислотами алюмосилікатів для покращення адсорбції тритію з водних розчинів	16

ГЕОФІЗИКА

Назаревич А., Назаревич Л., Баштевич М. Виділення малоамплітудних деформаційних аномалій – провісників місцевих Закарпатських землетрусів з урахуванням метеотермопружних деформацій	21
Меньшов О. Інформативність магнітних методів при моніторингу природно-техногенних процесів, які пов'язані з об'єктами критичної інфраструктури	27

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Михайлов В. Рудно-магматична система Sukumaland (Танзанія)	34
Хомин В., Цьомко В. Гоптарьова Н., Броніцька Н., Трубенко А. Геолого-промислові особливості розкриття та випробування слабопроникних газонасичених відкладів	42
Балега А., Курило М. Оптимізація фінансування стадій геологічного вивчення надр у вітчизняній практиці	49

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

Ободовський О., Онищук В., Почаєвець О. Перспективи використання гідроенергетичного потенціалу на річках басейну Дніпра (на прикладі р. Рось)	56
Наседкін Є., Іванова Г., Стадніченко С., Андреєв О., Морозенко В. Щодо антропогенної складової речовини атмосферного аерозолі м. Запоріжжя	63

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

Вижва С., Соловйов І., Круглик В., Лісний Г. Використання технології інтерактивної класифікації геологічних тіл для прогнозування покладів газу на сході України	70
Малік Т., Брик Я., Зацерковний В., Беленок В. Побудова моделі точності автоматизованої системи моніторингу деформацій інженерних споруд	77
Віршило І., Пап І. Інтегроване стохастичне моделювання петрофізичних параметрів для оцінки мінералогічного складу земної кори	83

ПОДІЇ

Курганський В. "Геофізичні дослідження свердловин" – 50 років у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка	89
Михайлов В., Іванік О., Янченко В., Кравченко Д. Слово про ювіляра. На честь 80-річчя професора Олександра Івановича Лукієнка	95

CONTENTS

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

Guliy V., Poberezhska I., Bilyk N.

- Peculiarities of distribution and composition of betafite
from different formations of the Aldan shield (Sakha-Yakutia).....9

Pushkarev V., Rudenko I., Zubko O., Dolin V. (Jr.)

- Nitrogen and humic acid activation of aluminosilicates for improving the adsorption of tritium from water solutions.....16

GEOPHYSICS

Nazarevych A., Nazarevych L., Bashtevych N.

- Selection of small-amplitude deformation anomalies – precursor of local Transcarpathian earthquakes
with taking into account the meteoelastostatic deformations.....21

Menshov O.

- Application of magnetic methods for monitoring natural and man-made processes associated
with critical infrastructure objects27

MINERAL RESOURCES

Mykhailov V.

- Ore-magmatic system Sukumaland (Tanzania).....34

Khomyn V., Tsyomko V., Goptarova N., Bronitska N., Trubenko A.

- Geological and industrial features of disclosure and testing of low-permeable gas-saturated sediments.....42

Balega A., Kurylo M.

- Optimization geological studies stages financing in domestic practice49

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

Obodovskiy O., Onischuk V., Pochaievets O.

- Perspectives of the usage of hydropower potential of the rivers of the Dnipro river basin
(on the example of the Ros River)56

Nasedkin Ye., Ivanova G., Stadnichenko S., Andreiev O., Morozenko V.

- Anthropogenic component of atmospheric aerosol substance of Zaporizhzhia city63

GEOLOGICAL INFORMATICS

Vyzhva S., Solovyov I., Kruhlyk V., Lisny G.

- Use of the technology of interactive classification of geological bodies
for gas deposits forecasting in eastern Ukraine70

Malik T., Bryk Ya., Zatserkovnyi V., Belenok V.

- Evaluation of engineering structures deformation (accuracy)77

Virshylo I., Pap I.

- Integrated stochastic modeling of petrophysical parameters for the estimation of mineralogical composition
of the earth crust.....83

MOMENTOUS EVENTS

Kurgansky V.

- "Geophysical researches of mining holes". 50 years at Taras Shevchenko National University of Kyiv89

Mykhailov V., Ivanik O., Yanchenko V., Kravchenko D.

- The 80th birthday anniversary of Professor Oleksandr Lukienko.....95

СОДЕРЖАНИЕ

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Гулий В., Побережская И., Билык Н.

Особенности распределения и состава бетафита из различных формаций Алданского щита (Саха-Якутия).....9

Пушкарев А., Руденко И., Зубко А., Долин В. (мл.)

Активация азотной и гуминовыми кислотами алюмосиликатов для улучшения адсорбции трития из водных растворов.....16

ГЕОФИЗИКА

Назаревич А., Назаревич Л., Баштевич Н.

Выделение малоамплитудных деформационных аномалий – предвестников местных Закарпатских землетрясений с учетом метеотермоупругих деформаций21

Меньшов А.

Информативность магнитных методов при мониторинге природно-техногенных процессов, связанных с объектами критической инфраструктуры27

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Михайлов В.

Рудно-магматическая система Sukumaland (Танзания).....34

Хомин В., Цемко В., Гоптарева Н., Броницька Н., Трубенко А.

Геолого-промышленные особенности раскрытия и испытания слабopоницаемых газонасыщенных отложений.....42

Балега А., Курило М.

Оптимизация финансирования стадий геологического изучения недр в отечественной практике.....49

ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Ободовский А., Онищук В., Почаевец Е.

Перспективы использования гидроэнергетического потенциала на реках бассейна Днепра (на примере р. Рось).....56

Наседкин Е., Иванова А., Стадниченко С., Андреев А., Морозенко В.

Об антропогенной компоненте вещества атмосферного аэрозоля г. Запорожья.....63

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

Выжва С., Соловьев И., Круглик В., Лесной Г.

Использование технологии интерактивной классификации геологических тел для прогнозирования залежей газа на востоке Украины70

Малик Т., Брик Я., Зацерковный В., Беленок В.

Построение модели точности автоматизированной системы мониторинга деформаций инженерных сооружений77

Виршило И., Пап И.

Интегрированное стохастическое моделирование петрофизических параметров для оценки минералогического состава земной коры.....83

СОБЫТИЯ

Курганский В.

"Геофизические исследования скважин" – 50 лет в Киевском национальном университете имени Тараса Шевченко.....89

Михайлов В., Иваник Е., Янченко В., Кравченко Д.

Слово про юбилея. В честь 80-летия профессора Александра Ивановича Лукиенко.....95

PECULIARITIES OF DISTRIBUTION AND COMPOSITION OF BETAFITE FROM DIFFERENT FORMATIONS OF THE ALDAN SHIELD (SAKHA-YAKUTIA)

Світлій пам'яті Юрія Капустіна присвячується!

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

Character of Nb and Ta distribution in the different geological formations of the Aldan Shield are given in this article. To get idea about betafite from different endogenic etalon formations the authors analyzed its well known locations in the pegmatites, skarns, carbonatites, metasomatites and late veins segregations. Geological setting and mineralogical composition of the apatite-bearing rocks from the Aldan Shield are described, and the most significant in scale metamorphosed carbonate and silicate varieties among them have been distinguished. Apatite mineralization in magnesium skarns and metasomatites is developed locally.

Titanite and betafite are the main concentrators of Nb and Ta and apatite is typical accompanying mineral in the studied rocks. Betafite was detected in the pegmatite bodies from magnesium skarns and metasomatites of the Shield with irregular distribution within rocks rich and poor in apatite, but was not found in the most developed apatite-carbonate rocks which are regarded as ores of the Seligdar type, so it cannot be mineralogical indicator for this type of ores.

Late carbonate generations are significantly enriched in light carbon and oxygen isotopes in contrast to positive $\delta^{13}\text{C}$ values in apatite-carbonate bodies of the Seligdar deposit and its family and the highest $\delta^{18}\text{O}$ values. We used these indicators to distinguish origin of the rocks with various carbonate generations, which have different amounts of betafite. Appearance of betafite is determined by primary composition of the initial rocks. Chemical composition of betafites from the skarns and metasomatites is similar, but with local variations. The most significant feature of the mineral composition is very low Ta content. Titanite is characterized by variable amounts of Nb and Ta in scale of sectors as well as within separate grains.

Keywords: betafite, titanite, Nb and Ta, metamorphic apatite-carbonate ores, Aldan Shield, pegmatites, metasomatites, skarns, carbonatites, C–O isotopes

Introduction and statement of the problem. Betafite is rich in Ti member ($2\text{Ti} \geq \text{Nb} + \text{Ta}$) of the pyrochlore group (Christy and Atencio, 2013; Hogarth, 1977), which was firstly discovered in pegmatites from the Betafo area, Madagascar (Turner, 1928). Later betafite finds were described in granite pegmatites and skarns of the Kragero, Norway, and Bancroft, Canada, (Bjorlykke, 1937; Hogarth, 1959; Hogarth, 1977), carbonatites, alkaline rocks, and young pegmatites (Kapustin, 1971; Lents and Suzuki, 2001; Pieczka, 2010) in various regions. Lately, betafite has been determined in the modern active volcanoes areas of Italia (Camara et al., 2004). Betafite is currently becoming interesting from mineralogical point of view, as a phase with wide substitutions of Ti, Ta, Nb, Ca, U etc. in the mineral structure and important indicator of different petrologic processes, and from industrial one as a mineral, which is bearing significant elements for modern technique and high technology (Lumpkin et al., 2001).

The discovery of the Seligdar apatite deposit in the Precambrian rocks of the Aldan Shield (Bulakh et al., 1990) has stimulated here scientific investigations of apatite-bearing formations. Apatite-carbonate mineralization at the Aldan Shield was earlier known after different geological mapping and exploration works and rich in apatite Precambrian rocks were described within metamorphic sequences of the Shield (Fig. 1) as the conformable bedding of apatite-bearing and host gneisses, crystalline schists, calc-silicate rocks and marbles (Vinogradov et al., 1975). Their regional distribution and geological position is confirmed by the lithological control of apatite-carbonate mineralization (Bulakh et al., 1990; Vinogradov et al., 1975; Guliy and Wada, 2003).

In opposite to these data betafite finds in various apatite-bearing metasomatites from the manifestations of the Nimnyr River basin as well as presence of Nb and Ta in phlogopite of the Seligdar deposit, some authors used to state (Entin et al., 1987; Entin et al., 1989) an indicator role of betafite-apatite association for apatite-bearing ores of the Seligdar type and its carbonatite origin.

We initiated our investigation of betafite distribution in the Precambrian rocks of the Aldan Shield, and peculiarities of the mineral composition from different formations of the Shield, to determine its origin and estimate possible betafite role as carbonatite indicator for the Seligdar apatite-carbonate ores type.

Analysis of latest investigations. Detailed geological exploration works at the Seligdar apatite deposit were accompanied by prospecting and assessment of analogous objects in other sectors of the Aldan Shield (see fig. 1). Due to these efforts, geologists of the Yakutskgeologiya Industrial Geological Enterprise discovered and evaluated apatite deposits in basins of the Bol'shoi Nimnyr, Yllymakh, and Timpton rivers (Bulakh et al., 1990; Guliy and Wada, 2004), which are located at the southern end of the apatite-bearing zone (see fig. 1). Major ore bodies consist of apatite-bearing carbonate and silicate rocks that are similar to earlier studied rocks in the Central Aldan deposits (Bulakh et al., 1990).

Idea about mantle carbonatite nature of the apatite-bearing ores of the Seligdar firstly appeared because of formal main similarity of carbonate-bearing mineral associations of the rocks and carbonatites (Kapustin, 1971; Mineev et al., 1978; Entin et al., 1987) and later modified to mantle-crust carbonatite origin under influence of folding structure of the deposit (Bulakh et al., 1990) with intercalations of apatite-bearing rocks and hosting gneisses and crystalline schists of the Fedorovskaya Formation within limits of ore bodies, the evidences on the metasedimentary carbon and oxygen isotopic composition of carbonates from apatite-carbonate ores (Guliy and Wada, 2003; Guliy and Wada, 2004), difference in REE and Sr enrichment of apatite from carbonatite, ultrabasic and alkaline rocks (Kapustin, 1971; Mineev et al., 1978; Pushkarev et al., 1989; Guliy et al., 2017).

Pinpointing unresolved issues. The most exotic hypotheses of apatite-carbonate rocks origin have given place to better documented models about the primary fold structure and metamorphogenic nature of the deposit (Bulakh et

al., 1990; Gulyi and Wada, 2003; Gulyi and Wada, 2004). At the same time, information on betafite finds in some "typical manifestation" (Entin et al., 1989, p. 83) or "studied character sector" (Entin et al., 1987, p. 948), without any indication of locality, with apatite-bearing rocks were involved to assert genetic relationships between the Seligdar deposit and carbonatites. After these researches there are no clear evidences about genetic relations of betafite and apatite-carbonate rocks of the Aldan Shield, in general, and the phosphate ores of the Seligdar deposit, in particular.

Carbonatites and genetically related alkaline rocks are regarded as mantle differentials and it determinates their specific composition and origin (Kapustin, 1971), but betafite presence in various environment situations itself can't be suggested meaning on its origin. So, it is necessary to search for paragenetic associations of betafite and carbonate to determine peculiarities of the primary betafite.

Setting objectives. This paper presents results of the systematic search of betafite peculiarities from various endogenic complexes to determine its origin in apatite-bearing formations of the Aldan Shield. We attempt to trace genetic links between the betafite finds and hosting its primary and

metasomatic rocks, to estimate the role of parent's sources of the mineral, and to outline conditions of the formation and preservation of initial rocks.

Research part and findings validated.

1. Geological setting and main rocks types.

Structural situation, shape of the ore bodies, analogous apatite-carbonate composition of the ores are common features of all apatite deposits of the Aldan Shield, but a big variation in thicknesses and lengths is different for the most deposits. The most significant dimensions are typical for the Seligdar deposits where total thickness of the intercalated apatite-calcites rocks and host gneisses and crystalline schist in limits of industrial counter is about 1000 m.

The most variable dimensions of the apatite-bearing rocks are typical for deposits in basins of the Bol'shoi Nimnyr, and the Yllymakh rivers. Besides its features among these deposits there are sharp compositional variations of apatite-bearing rocks (Tab. 1). Deposits on this territory are represented by small in size ore bodies, often they are like veins in shape, and some of them are rich in quartz (Bulakh et al., 1990; Gulyi and Wada, 2004).

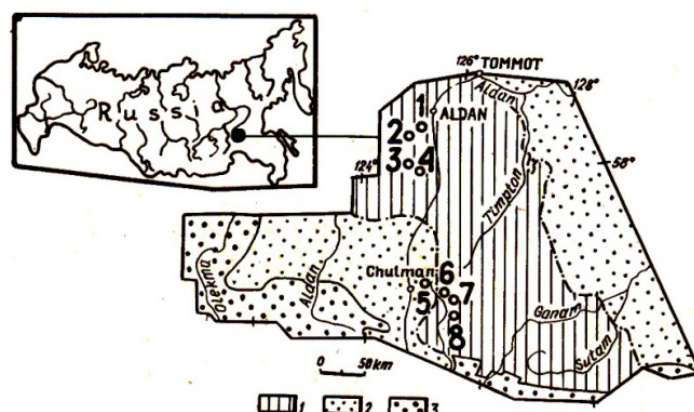


Fig. 1. Location scheme of apatite deposits of the Aldan Shield.

Location: 1- Seligdar, 2 – Niryandzha, 3 –Dorozhniy, 4 – Mustolaakh, 5 –Ust'Chul'man, 6 – Levyy Byrnyi, 7 – Birikeen, 8 – Chukurdun. (1) – high-grade metamorphism, (2) – transitional metamorphic facies, (3) – relatively low-grade metamorphism (Kitsul et al., 1979)

Table 1

Mineral composition of the apatite-bearing rocks from sectors of the Bolshoi Nimnyr River basin

Sector	Rocks	№ samples	Minerals (vol. %)						Sum
			apa-tite	Dolomite	calcite	quartz	chlorite	hematite	
Dorozhniy	Apatite-carbonate	к. 1	8,7	84,0	-	-	7,3	-	100,0
		к. 2	22,5	58,0	-	4,0	14,0	1,5	100,0
Trubka		12	1,2	74,0	10,0	9,8	5,0	-	100,0
		14	5,2	56,1	18,1	8,3	11,3	1,0	100,0
	Apatite-quartz	16	0,5	-	-	93,5	6,0	-	100,0
Osenniy List		3	1,0	-	-	98,0	1,0	-	100,0

These characteristic deposits in this area are similar to numerous vein-types metasomatite deposits rich in rare, rare earth and radioactive elements (Goroshko et al., 1975; Radkov et al., 2015). Quartz, carbonates, apatite, chlorite are main minerals in these deposits and betafite, titanite, sulfides, zircon were determined as accessory phases (Bulakh et al., 1990). All vein-types metasomatite deposits are connected to late stages of tectonic-magmatic activization of the Aldan Shield and also related to faults zones (Radkov et al., 2015).

Local distribution and small in scale are apatite-bearing formations which are connected to the magnesium skarn deposits (Bulakh et al., 1990). It bears similarity to calc-silicate rocks, which are developed together with apatite-bearing

rocks and obligated to the presence of phosphorus and favorable physico-chemical environments for the precipitation of the protophosphate sediment in paleobasins elsewhere.

2. Sampling and analytical methods.

2.1. Material studied.

We collected diverse data on distribution of betafite in different endogenic formations, its connection to various mineral associations, distinguished features of the mineral for separate and individual petrologic regimes, based on early published information from scientific works as well as using our own materials.

During field surveys we observed drilling cores after prospecting works by geologists of the Yakutskgeologiya Industrial Geological Enterprise, quarries of the magnesium skarn deposits, and outcrops within area of the apatite-bearing

rocks distribution to get information about betafite presence at the various formations of the Aldan Shield and its location and composition peculiarities.

2.2. Analytical methods.

Beside routine geological investigations we carried out petrographic studying of thin sections to determine crystallization ordering for minerals of apatite-bearing rocks and its hosting gneisses, schists, marbles, magmatites, skarns, pegmatites, metasomatites etc., which are typical for the Aldan Shield region.

A set of different in size samples we used to find and determine peculiarities of betafite and other accessory phases among the apatite-carbonate ores. We also studied samples with different weights from a couple of kilograms up to 40 tons (Bulakh et al., 1990), which have been prepared for technological testing to determine the quality of the ores as well as discover accompanied minerals, including betafite.

Microbeam analyses of betafite, titanite, apatite and other associated minerals grains were carried out using a SX50, Cameca according to routine procedure. Involved instruments include facilities of the Geological Survey of Canada and Carlton University (Ottawa, Canada), Mekhanobr-Analit and PGO Sevzapgeologia (St.-Petersburg, Russia). We analyzed chemical composition of separate phases as well as components variations within grains. Set of the betafite and titanite grains were used to determine its inner heterogeneity and distribution of Nb and Ta in co-existing phases.

The oxygen and carbon isotopic compositions of carbonates from the typical apatite-carbonate ores, as well as from late carbonate veins, metasomatites, and skarns, were analyzed in the Laboratory of Stable Isotopes (Institute of the Lithosphere of Marginal Seas, Moscow). The relative difference in oxygen and carbon isotope ratios in CO₂ (gas) was measured on a Varian MAT-250 mass spectrometer. The accuracy of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ measurement in 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). To determine metasomatic alteration of initial rocks and nature of new formed carbonates we used the diagram of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ according to procedure described early for different carbonate rocks of the Aldan Shield (Guliy and Wada, 2003; Guliy and Wada, 2004).

3. Obtained results and discussion.

3.1. Character of betafite distribution in the endogenic formations.

The first most famous locations of betafite are known (Turner, 1928) from the Madagascar pegmatites. The big in size and weight betafite crystals are located in zones formed essentially of quartz and altered biotite with orthite, tourmaline and traces of former beryl crystals. A number of pegmatite locations near Kragero (Norway) with betafite had been described (Bjorlykke, 1937) to give a mineralogical description of the objects mined many years before. The pegmatite dikes at the Tangen feldspar quarry are surrounded by amphibolites and chiefly composed of cleavelandite and quartz, but sometimes with numerous irregular patches of microcline. Betafite in these dikes is associated with noted (Bjorlykke, 1937) microcline, quartz, oligoclase, cleavelandite, tourmaline, topaz, magnetite, hematite, apatite, yttritanite, orthite, alvite, thorite, columbite, and phenacite. Within pegmatites betafite crystals occur both in microcline and cleavelandite. The last has been stained red around the nodules of betafite. To distinguish pegmatites in different parts of Norway there was used (Bjorlykke, 1937; Pršek et al., 2010) the plenitude of Ca as indicated by the presence of calcite, rare minerals, hellandite, titanite, and betafite.

Similar betafite occurrences connected to pegmatites had been described (Hogarth, 1959; Lents and Suzuki,

2001) in the Bancroft Region, Ontario, Canada, due to feldspar mining and prospecting for uranium in Canada. D. Hogarth essentially expanded a number of betafite-bearing rocks and added (Hogarth, 1959) to previously known pegmatites also granite-syenite, irregular carbonate bodies, calcite-fluorite-apatite veins, radioactive breccias and carbonatites, which are developed in some adjacent parts of the Ontario and Quebec Provinces. Calcite-fluorite-apatite veins cut granite pegmatites and hornblende gneisses, and they are traced by betafite crystals in association with apatite, calcite and mica. More significant betafite concentration is described (Hogarth, 1959) in apatite-rich portions in the Basin carbonate body, which is regarded as a carbonatite or as a mineralized lens of the Grenville limestone.

Clastic structures north of Meach Lake were previously described (Hogarth, 1959) as conglomerates or explosive breccia, and the rocks are distributed irregular, showing independence from primary substratum. Calcite, apatite and biotite are common matrix minerals with significant variations of its amounts from occurrence to occurrence. Apatite occurs as rounded prisms which are often fractured near betafite. Betafite crystals look fresh, but the matrixes of breccia are rich in limonite or hematite dust and are light brown in color.

Numerous amphibole veins hold small amounts of biotite, quartz, apatite and pyrite. Thin sections showed minor hematite, titanite, calcite, pyroxene, zircon and plagioclase. Betafite occurs as small rounded octahedral and is most common where apatite is abundant.

The vein carbonate is notably impure. The minerals include apatite, pyrite, pale amphibole and phlogopite, with rare quartz, betafite, zircon, magnetite and feldspar. The betafite was observed in the apatite-rich zone and was localized along strike fractures near the hanging-wall of the carbonate body. Grains usually show numerous inclusions of apatite and calcite. Hematite often rims the grains.

There are two main kinds of carbonatites, early and late (Kapustin, 1971). Early carbonatites (sevites) form a big in thickness monolithic stocks (up to 5 km in diameter), systems of conic-ring-shaped or linear cutting veins (up to 10 km in length) with sharp contact. These veins have regular composition and texture, without visible zonation, in boarder parts are represented by eruptive breccia, and often contain xenoliths of hosting rocks. Within contacts, in narrow zone (from 0.1 up to 1.0 m), all hosting rocks are altered with new-formed of phlogopite (biotite), pyroxene, and apatite. Pyrochlore, gatchetollite, baddeleite, calcitrite or zircon are accessory minerals of sevites. High contents of Ti, REE (mainly Ce series), Nb, Sr (typically from 0.1 up to 1.0 %), and Ta, U, Th (less than 0.1 %) are typical for these rocks.

Early carbonatites have systems of features which are typical for intrusive (or effusive-volcanogenic) rocks, but intensive magnesium-alkaline metasomatism of hosting rocks is permanently connected to its. With big in scale concentrations and regular enrichment by apatite, grade of P₂O₅ everywhere is up to 3.0 wt.%. Minerals of Nb and baddeleite are associated with apatite in all massive (Kapustin, 1971).

Late carbonatites are multistage and they form series of linear veins, small stocks, sometimes with clear symmetric zonation, mineralized brecciated zones with intensive metasomatism of hosting rocks. Brecciated cavity-druse crustification and vein structures are typical for the late carbonatite. Besides extremely irregular, often zoned structure of its bodies, late carbonatites are everywhere enriched by Sr, Ba, REE, with amount commonly more than 1–5 %. But these carbonatites don't contain their own Nb concentrations, and only in some places of ankkerite development within hosting earlier pyrochlore-bearing carbonatites, where pyrochlore

and gatchetolite are fully replaced by columbite, Nb concentrations are increasing (equal or higher than 1 %). In structure, composition and character of near vein alteration late carbonatites are similar to hydrothermal sulfide-carbonate veins and, probably, were formed under circulation of hydrothermal solutions, which are retained after crystallization of earlier carbonates.

3.2. Ta and Nb distribution and its concentrators in the hosting rocks of the Aldan Shield.

Results of Ta and Nb distributions in different formations of the Aldan Shield geologists used to create indicators for exploration of rare, radioactive elements and precise metals (Goroshko et al., 1975; Radkov et al., 2015). According to previous explorations at the Aldan Shield, relatively high Nb and Ta concentrations dominantly form only geochemical anomalies which are connected to pegmatite veins and metasomatites reworking after tectonic-magmatic activation of the Precambrian basement. Some of them are located at the western and southern borders of the Shield and to the eastern areas from the rich in apatite deposits zone (see fig. 1). In most cases the Nb and Ta manifestations were discovered during mapping and explorations of uranium mineralization.

At the Central Aldan Nb and Ta mineralization is related to alkaline granites (Radkov et al., 2015) where numbered quartz-feldspar veins are developed in linear zones of hydrothermal altered rocks after primary metamorphic rocks of the Fedorov Formation. The last rocks are often red in color due to hematite pigmentation. Veins pegmatites which are located within the magnesium skarns deposits have commonly simple composition.

Beside Nb and Ta anomalies, vein pegmatites, alkaline granites and metasomatites in this part of the Shield are rich in uranium, phosphorus, and some associated rare and rare earth elements mineralization. Therefore, this area was under exploration and small in scale uranium deposit Osenniy List (near Dorozhnyi and Mustolaakh deposits, see fig. 1) has been established (Radkov et al., 2015). Here, phosphorus-rare metals – uranium mineralization is located within carbonate – quartz – epidote – chlorite metasomatites and breccia which are connected to linear zones with thicknesses up to a few dozen meters. Gneisses and crystalline schists of the Fedorov Formation are hosting rocks for developed zones. Uraninite, coffinite, betafite associated with apatite, pyrite, titanite and fine grained hematite are common minerals in the ore aggregates. Typical limits of the Nb concentrations are from 0,11 up to 0,72% Nb₂O₅, under phosphorus amounts from 0,05 up to 7,72% P₂O₅.

For these ore concentrations have been noted (Radkov et al., 2015) age formation from 650 up to 1420 m.y. We obtained (Pushkarev et al., 1989) the united Pb – Pb isochrones with 1854 ± 7 m.y. for apatite from the apatite-carbonate ores of the Seligdar, Mustolaakh, Niryardzha deposits and this date is older.

At the Seligdar deposit Nb concentrations (from 0.002 up to 0.06 % of Nb) have been reported to have phlogopite from near ore magnesium skarns, which are represented by diopside, pargasite-diopside, pargasite and diopside-plagioclase rocks. Relatively similar levels of Nb (from 0.03 up to 0.05 % Nb) are given (Entin et al., 1987) for the Elkonka and Emeldzhaskarn deposits and barite-hematite-quartz ores of the Hematitovoe deposit. Within basin of the Bolshoi Nimnyr River (see fig. 1), where metasomatites with rare metals and uranium mineralization, noted above, are developed, the analogous Nb concentrations have been suggested for the metasomatites from the Saap-Kyuel, Kaplia, Dorozhnyi sectors. Information on Ta concentrations and finds of betafite for this area from the authors was absent, but later on they published articles (Entin et al.,

1987; Entin et al., 1989) with description of betafite in apatite-bearing ores of the Seligdar type. However, in these cited articles any suggestion from which place authors collected betafite is absent. There is not also any mention on betafite presence in the apatite-carbonate ores of the Seligdar deposit.

Previously we suggested betafite finds in the late metasomatic rocks of the Trubka, Dorozhnyi, Kaplia etc. manifestations within basin of the Bolshoi Nimnyr River (Bulakh et al., 1990). These rocks are rich in quartz, epidote, chlorite, and apatite and in fact they are hosting Nb, Ta and uranium mineralization. We also detected permanent Nb and Ta presence in the titanite from the apatite-diopside rocks of the Bish deposit, which is located to the south from the southern apatite deposits (see fig. 1) and have relatively high abundances of Nb and Ta (up to 0,17% Nb₂O₅ and 4,40 % Ta₂O₅). Similar in mineral composition rich in titanite apatite-diopside rocks and metasomatites with the high levels of Nb (up to 0,35 % Nb₂O₅) and Ta (up to 1,71 % Ta₂O₅) are developed in the Bolshoi Nimnyr River basin. Significant Nb and Ta concentrations (up to 0,16 % Nb₂O₅ and 1,49 % Ta₂O₅) we determined in titanite from feldspar rocks of the Seligdar deposit. Due to additional research of the titanite homogeneity we observed inverse ratio in Nb and Ta distributions in cores and rims of the separate titanite crystals.

Extremely high Nb/Ta ratios (up to 239) described (Chen Y.-X. and Zheng Y.-F., 2015) for metamorphic titanite from ultrahigh-pressure metagranite in the Sulu orogen, CPR. The increase of Nb/Ta ratios for the metamorphic titanite is associated more with a decrease of Ta than an increase of Nb, suggesting the control of fluid composition on the titanite Nb/Ta ratios. Taking into account a wide betafite development after rich in titanite rocks in the Bolshoi Nimnyr River basin with intensive brecciation of the initial rocks we can regarded the titanite as a precursor of betafite according to the described substitutional scheme (Minerals, 1967; Minerals, 1968) without any relations to carbonatites.

3.3. Chemical composition of betafite

We studied betafite from the Emeldzhak deposit which has up to 6.49 % of Ta₂O₅ and 9.6 – 11.4 % of CaO under ratios Nb₂O₅/Ta₂O₅ = 6 – 8 and Nb₂O₅/TiO₂ = 2.7 – 3.5 (tab. 2). After calculations of the results of this mineral (№ 5 in the table 2) with the typical formula we obtained final form: (Ca_{1.00} U⁴⁺_{0.32} Na_{0.29} TR_{0.06} Th_{0.03})_{1.70} (Nb_{1.15} Ti_{0.77} Ta_{0.08})_{2.0} O_{6.00} [F_{0.72}(OH)_{0.28}]_{1.00} × 0.95H₂O. Betafite from the Emeldzhak is characterized by clear high Nb amount and low concentrations of Ti and U.

Aldan's betafite is sharply distinguished from gatchetolite from carbonatites in composition. The latter contains 8–25 % of Ta₂O₅ under ratios Nb₂O₅/Ta₂O₅ = 3 – 5 and Nb₂O₅/TiO₂ = 3 – 8 with U₃O₈ up to 20 % and CaO ≤ 14 %. There is a direct positive correlation between Ta and U concentrations in the betafite. Gatchetolite is found only in the early calcite carbonatites and during its dolomitization the mineral is replaced by pyrochlore with high Nb amount (U < 1 %). Gatchetolite and pyrochlore are replaced by columbite during ankeritization.

Betafite from the quartz-chlorite diaforites of the Dorozhnyi deposit (Guliy et al., 2017) contains unusually low Ta concentration (tab. 3) with ratio Nb₂O₅/Ta₂O₅ > 300, while Ta₂O₅ amount for majority samples of this mineral is 3–10 %, with minimal concentration in 0.54 % (Minerals, 1967), and ratio Nb₂O₅/Ta₂O₅ is typically within limits of 10–30 (maximum 80). Concentration of TiO₂ and ratio Nb₂O₅/TiO₂ in the mineral is common for betafite. Judging by the Ti content, in the Aldan betafite should be about 20 % of UO₂ (this component didn't determine in the analysis and, possibly, it was included to "other").

Table 2

Chemical analyses of betafite from magnesia skarns of the Aldan Shield (number 4–7) and the Near Baikal region

Components	Number of analysis			
	5	6	7	16
Nb ₂ O ₅	35.27	34.50	57.64	36.64
Ta ₂ O ₅	4.32	5.49	2.75	3.95
TiO ₂	12.84	13.73	3.17	13.46
ThO ₂	2.00	2.15	0.46	1.90
U ₃ O ₈	19.50	21.11	3.11	20.90
TR ₂ O ₃	2.11	1.80	2.68	2.78
FeO	2.73	2.36	-	2.64
MnO	-	9.61	-	0.71
CaO	12.42	0.10	-	9.76
(Sr,Ba)O	0.22	2.60	-	0.17
PbO	1.67	1.60	-	1.90
Na ₂ O	1.85	-	-	0.81
H ₂ O	3.80	-	-	3.90
F	2.93	-	-	2.05
O = F ₂	1.20	-	-	0.84
Σ	100.46	-	-	100.73

Note. Analyses 5–7 – skarns of the Emeldzhak deposit. Analytic – G.V. Lyubomilova. Analysis 16 – skarns of the Slyudianka deposit. Analytic – T.A. Kapitonova. n.d. – not detected.

Table 3

Chemical composition of betafite from apatite-bearing rocks of the Bolshoi Nimnyr River basin (wt. %)

Components	Number of sample			
	1	2	3	4
Nb ₂ O ₅	30.39	31.20	30.62	40.45
Ta ₂ O ₅	0.10	N.d.	N.d.	-
TiO ₂	14.92	15.17	16.32	13.91
ZrO ₂	1.52	N.d.	N.d.	-
SiO ₂	3.06	2.73	1.25	-
TR ₂ O ₃	0.23	0.23	0.73	24.03
Al ₂ O ₃	0.32	0.44	0.14	-
FeO	2.86	2.99	2.65	-
MnO	0.18	0.14	0.15	-
CaO	19.15	19.53	19.88	20.52
PbO	0.39	0.43	0.49	-
Na ₂ O	0.62	0.82	0.55	-
I.o.v	22.19	22.37	23.56	-
Sum	96.54	96.15	96.34	98.91

Note. Samples 1–3 – (Entin et al., 1987; Entin et al., 1989). Analytic – V.F. Makhotko, 4 – authors data. Analytic – O.A. Yakovleva.

There is an unusually high level of CaO concentrations (up to 19 %), although it is commonly around 3 – 9 % (maximum up to 11.54 % (Minerals, 1967). Calculation of data № 1–3 from table 3 (Entin et al., 1987) on typical betafite-pyroxhlore formula (Ca, U)₂(Nb, Ti)₂O₆ Fe nH₂O the formulas of analyzed samples (№ 1–3) led to the next form: (Ca_{1.7}Na_{0.1}Fe²⁺_{0.2})_{2.0}(Nb_{1.1}Ti_{0.9})_{2.0}O_{6.7} nH₂O. According to the chemical analysis and our results the mineral contains about 20% UO₂, and thus its final formula should be more complicated: (Ca_{1.7}U⁴⁺_{0.4}Na_{0.1}Fe²⁺_{0.2})_{2.4}(Nb_{1.1}Ti_{0.9})_{2.0}O_{7.3} nH₂O (there is a possibility of presence in the mineral about 2–3 % of F). These formulas show clear overstating of the cations amounts (most likely Ca) up to 7–10 mass %. For all minerals of the pyroxhlore group and especially for betafite there is a typical deficit of cations in Ca group (formula coefficient of this group is commonly less than 2 (1.2–1.7)).

To generalized collected and authors' data on chemical composition of the betafite from different geological formations of the Aldan Shield (table 2 and 3) we used triangle diagram of Ti - Nb - Ta (fig. 2) which takes into account role of the main classification constituents of the pyroxhlore group (Hogarth, 1977). Additional betafite compositions for carbonatites, pegmatites and skarns are plotted from data in (Minerals, 1967; Minerals, 1968; Sakharova, 1955).

On the diagram the figurative points of betafite from the apatite-bearing rocks are located on or near the Ti - Nb line. They are concentrated very close to the line between betafite and pyroxhlore fields, but in general are determined as betafites. Compositional data for other genetic types of the

rocks used to draw the diagram are much more variable and are not located in some limited fields. From the noted configurations we can assume specific composition of betafite from the apatite-bearing rocks which is far from common for carbonatite data.

3.4. Isotope signatures in carbonates of the region

In the $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ coordinates the isotopic compositions of carbonates from layered apatite-carbonate rocks of all apatite deposits yield a scatter of $\delta^{18}\text{O}$ values from +18.0 up to +21.6 ‰, SMOW without any depending from apatite resources. The studied carbonates are characterized by positive $\delta^{13}\text{C}$ values in sheeted apatite-carbonate bodies of the Seligdar deposit and its family (up to +4.4 ‰, PDB) and negative values in late spatially associated veinlet and isolated pockets ($\delta^{13}\text{C}$ values from -0.7 up to -5.2 ‰, PDB).

Late carbonates from veinlets and pocket-like aggregates are significantly enriched in light carbon isotope (lowest $\delta^{13}\text{C}$ value is -5.2 ‰, PDB for carbonate of the Khayumkan sector).

Carbonate from skarns of the Emeldzhak deposit is depleted in ^{13}C and ^{18}O (up to $\delta^{13}\text{C}$ = -6.6 ‰, PDB, and $\delta^{18}\text{O}$ = +13.5 ‰, SMOW). Similar depleted ^{13}C values we determined for carbonates from the calciphyres and marble (up to $\delta^{13}\text{C}$ = -3.8 ‰, PDB), but carbonates from the Ariabilovka, Sivagli, Mariika deposits are enriched in ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$ vary from +20.3 up to +21.6 ‰, SMOW) and analogous to ^{18}O values in carbonates from the apatite-carbonate rocks of the Shield (Guliy and Wada, 2004).

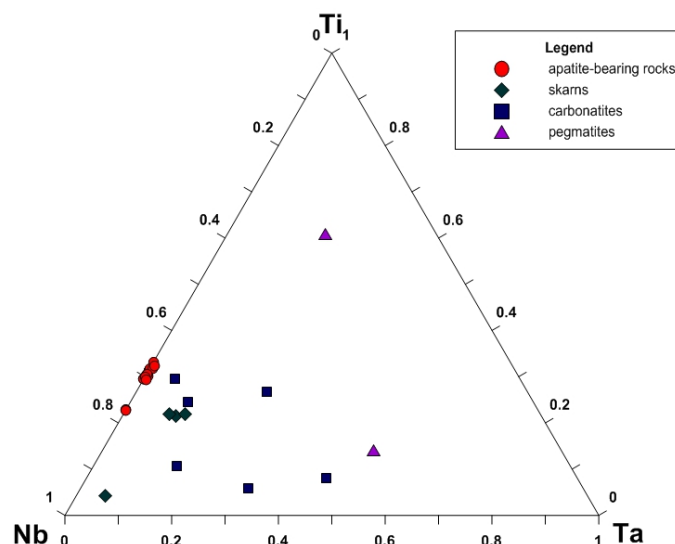


Fig. 2. The triangle diagram of Ti – Nb – Ta for betafite from different geological formations of the Aldan Shield and elsewhere (*Minerals, 1967; Minerals, 1968; Sakharova, 1955*)

4. Discussion of the results and conclusions.

Betafite polygenetic origin is well known and its finds were described in fenites, albitites, "apogranites", alkaline metasomatites and nepheline syenites. But the most significant typical betafite finds are in granite pegmatites of Norway, Madagascar, Finland, Karelia, and Kola Peninsula, South-Western areas of the Near Baikal and syenite pegmatites of the Urals (*Minerals, 1967; Minerals, 1968*). According to comparison of betafite from different geological locations similarities of betafite from the Aldan samples and granite pegmatites of the Urals and Norway were established as well as sharp difference from gatchetolite from carbonatites.

There has been shown clear difference between apatite-carbonate rocks of the Seligdar type and any kind of carbonatites. The apatite-carbonate rocks differ from sevites by dolomite composition, absence of silicates (diopside, eugerie, phlogopite, gastinsite, monticellite) which are typical for carbonatites, and magnetite, baddeleyite, Nb minerals, absence of indicator for carbonatites fenitization and near-contact alkaline-magnesium metasomatism (with new-formed phlogopite, pyroxene, and olivine), and extremely low levels of Sr, REE, Nb, Ta, Zr, Ti. In contrast to the late carbonatites, the Seligdar apatite-carbonate ores are not completely composed of Sr, Ba, REE and Ti minerals, and sulfides, and are characterized by extremely low concentrations of Sr, Ba, REE, Ti, Fe (II), S, F, and absence of multi-stages features as well as a low temperature magnesium-ferruginous metasomatism in surrounding rocks.

Absence of alkaline rocks and alkaline metasomatites at the Seligdar deposits as well as concordant bedding of the apatite-bearing and associated rocks with rich in Cl and SO₃ apatite under extremely low levels of Sr and REE are evidences on the primary sedimentary origin of the mineralization.

There has also been shown distinctive difference between minerals from the Seligdar apatite deposit with well-studied minerals of carbonatites. Seligdar's dolomite contains significant admixtures of Fe₂O₃ (including of fine dispersions of hematite) with extremely low amount of Fe (II), and apatite is characterized by high concentrations of Fe₂O₃, SiO₂, Cl, and SO₃. Both minerals are poor in Sr, Ba, and REE (up to 0.1%).

Fluor-apatite with 50 % of hydroxyl-apatite mineral and trifling (less than 0.1%) amounts of Cl and SO₃ with constant high Sr and REE (mainly Ce series) is typical for carbonatites

(*Kapustin, 1971*). Calcite from earlier carbonatites is also enriched by Sr and REE, and ferrodolomite – ankerite from late carbonatites is relatively barren of these elements, but enriched by FeO (up to 5%) under absence of Fe₂O₃. Comparison of REE ratios in apatite from the Seligdar deposit and other deposit has shown its relative similarity (*Minerals, 1968; Gulyi et al., 2017*).

At the same time apatite from the Seligdar deposit and Nimnir's manifestations is practically identical to apatite from quartzites, calciphyres and phlogopite-bearing metasomatites (magnesian skarns and veins) of the Slyudianka and Emeldzhak deposits after composition, although apatite from the Emeldzhak deposit is enriched in REE. High amounts of Cl and SO₃ are typical for apatite from metasedimentary and metasomatic-metamorphic formations, with ratio F/Cl equal 0.5–1.0 and F/SO₃ from 3 up to 7.

Isotopic investigations of carbonates of all genetic types from the Aldan Shield showed (*Gulyi and Wada, 2003; Gulyi and Wada, 2004*) that apatite-carbonate rocks differ from other carbonate rocks, particularly Ca – Mg metasomatites, skarns and carbonatites, in carbon and oxygen isotopic compositions. Isotopic data indicate clear difference in nature of carbonate materials from the apatite-carbonate rocks of the Seligdar and allied apatite deposits and late metasomatites which are locally developed in the basin of the Bolshoi Nimnir River within area with apatite-carbonate primary sedimentary rocks. Peculiarities of the C and O isotope compositions of the different genetic types of carbonate rocks at the Aldan Shield and determined specific rich in heavy carbon and oxygen isotopes carbonates for the apatite-carbonate rocks as signatures of a primary sedimentary protolith are in accordance with isotopic models proposed (*Lents and Suzuki, 2001*) for carbonate family rocks similar in geological position and origin at the Canadian Shield.

Apatite-bearing manifestations of the Aldan Shield which are regarded now as the 'Seligdar type' have heterogeneous origin. Besides dolomite layers within the deposits there are primary quartzite, quartz and quartz-chlorite metasomatites with poor in apatite mineralization, and probably primary apatite-bearing calciphyres. Betafite finds within late diatrites which are located far from the Seligdar deposits cannot be indicator of its carbonatites origin of the apatite-bearing rocks. In addition to this fact, composition of the betafite without Ta from the diatrites sharply differs from gatchetolite from carbonatites, which is commonly enriched by Ta, and is closely similar to betafite from granite pegmatites.

In fact, betafite was found in metasomatites and breccias, which are developed in breaking zones of gneisses, quartzites, and possibly quartz-carbonate rocks with apatite. Taking into account relatively high temperature conditions of betafite formation in intrusive rocks during magmatic or high temperature pneumatolite stage, the mineral can be relic in origin in the quartz-chlorite diatexites. In rock blocks with cataclastic textures betafite is evidently detrital in origin. The mineral grains together with rounded or angular quartz and apatite are cemented by late quartz, epidote, carbonate and chlorite aggregates.

Betafite is a sporadic mineral in the high metamorphosed Aldan granite-gneisses and associated granite and pegmatite bodies. At the Emeldzhak phlogopite deposit in the quartz-feldspar lensed in shape pegmatites within gneisses we found rare small (up to 2 mm) betafite and pyrochlore grains in association with crystals of accessory titanite, magnetite and zircon which intergrowth to foggy quartz in the center of pegmatoids lenses.

Genetically indeterminate finds of betafite in metasomatic altered cataclases far from the Seligdar deposit cannot be determined as genetic types of the deposit. Thus, the Seligdar's carbonates, taking into account structures, composition amounts and REE ratios cannot be compared to any well-known kinds of carbonatites. Finally, apatite compositions from the Seligdar deposit are evidences for clear determination of the deposit as sedimentary-metamorphic formation with some metasomatic secondary alterations (Bulakh et al., 1990; Kapustin, 1971; Guliy et al., 2017).

Determination of the Seligdar' rocks as a special "crust carbonatites" has not any sense due to absence of descriptions of these carbonatites. Finally, there are not any evidences to regard betafite with basite and gabbro-anortozite intrusives (Entin et al., 1987), due to absence of betafite in these rocks and extremely low levels of Nb, Ta, U, TR. There is not any evidences to distinguish "formation of the crust carbonatites" similar to the Seligdar kind of rocks, due to the typically mantle origin of alkaline rocks and carbonatites, which have specific combination of the geological and geochemical indicators features, suggestion on their mantle nature.

Acknowledgements. We would like to thank J.A.R. Stirling, Geological Survey of Canada, and P. Jones, Carlton University (Ottawa, Canada), who analyzed the compositions of betafite, apatite, titanite and other coexisting minerals. The authors are also grateful to Yu.I. Kretser, N.S. Rudashevskiy, Mekhanobr-Analit, and O.A. Yakovleva, PGO Sevzapgeologia (St.-Petersburg, Russia) for additional microprobe analysis of betafite, titanite and apatite. We remember a great help of Yu.A. Borshchevskii and N.I. Medvedovskaya (ILSAN, Moscow, Russian Federation) for assistance in the isotope analysis of carbonates.

Список використаних джерел

- Булах, А.Г., Гулий, В.Н., Золотарев, А.А. (1990). Фосфорные руды докембрийских толщ Алдана (геология, минералогия, генезис). Ленинград: Изд-во ЛГУ.
- Виноградов, В.И., Егин, В.И., Кичигин, Л.И. и др. (1975). Значение литологического контроля апатитоносности архейских образований Алданского щита (по данным изотопного состава серы). *Литология и полезные ископаемые*, 5, 117–127.
- Горошко, М.В., Осипов, А.Л., Кириллов, В.Е., Соломатин, В.Г. (1995). Предпосылки выявления новых видов полезных ископаемых в юго-восточной части Алданского щита. *Тихоокеанская геология*, 2, 111–118.
- Капустин, Ю.Л. (1971). Минералогия карбонатитов. Москва: Наука.
- Кицун, В.И., Богомолова, Л.М., Дук, В.Л. (1979). Метаморфические и минеральные фации как индикаторы тектонической структуры фундамента Алданского щита. Метаморфизм горных пород Урала. Свердловск: ИГ УО АН СССР, 41–46.
- Минеев, Д.А., Ильина, О.Н., Кравченко, С.М. и др. (1978). О геохимических особенностях апатитовой минерализации селигдарского типа. *ЗИ. ВИЭМС. Геологические методы поисков и разведки месторождений неметаллических полезных ископаемых*, 3, 8–17.
- Минералы. (1967). Москва: Наука, 2 (3).
- Минералы. (1968). Москва: Наука, 3 (2).

Пушкарев, Ю.Д., Гулий, В.Н., Кравченко, М.П. и др. (1989). Изотопный состав Рb и Sr в месторождениях апатит-силикатных и апатит-карбонатных руд Алданского щита. *XII Всесоюзный симпозиум по стабильным изотопам в геохимии. ГЕОХИ. Москва*, 10–11.

Радьков, А.В., Молчанов, А.В., Артемьев, А.В. (2015). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-51. Алдан. Объяснительная записка, Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.

Сахарова, М.С. (1955). Метаморфизированные апатитоносные породы архея Южного Прибайкалья. *Труды ГИГХС. Москва: Госхимиздат*, 70–94.

Энтин, А.Р., Кравченко, С.М., Тянь, О.А., Махотко, В.Ф. (1987). Бетафит-апатитовая ассоциация как индикатор формационной принадлежности руд селигдарского типа. *Доклады АН СССР*, 293, 4, 948–951.

Энтин, А.Р., Тянь, О.А., Махотко, В.Ф., Кравченко, С.М. (1989). Титано-ниобаты в рудах селигдарского типа. *Советская геология*, 2, 83–90.

Bjorlykke, H. (1937). Mineral parageneses of some granite pegmatites near Kragero, southern Norway. *Norsk Geol. Tidsskr.*, 17, 1–16.

Camara, F., Williams, C.T., Della Ventura, G., Oberti, R., Caprilli, E. (2004). Non-metamict betafite from Le Carcarelle (Vico volcanic complex, Italy): occurrence and crystal structure. *Mineralogical Magazine*, 68(6), 939–950.

Chen Y.-X., Zheng Y.-F. (2015). Extreme Nb-Ta fractionation in metamorphic titanite from ultrahigh-pressure metagranite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 150, 53–73.

Christy, A.G., Atencio, D. (2013). Clarification of status of species in the pyrochlore supergroup. *Mineralogical Magazine*, 77, 13–20.

Guliy, V.N., Wada, H., (2003). Macro- and Micro-variations in the Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Precambrian Carbonates from the Aldan Shield. *Geochemistry International*, 41 (5), 431–439.

Guliy, V.N., Wada, H., (2004). Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of Carbonates from Precambrian Apatite-Bearing Carbonate Rocks of the Aldan Shield. *Lithology and Mineral Resources*, 39 (3), 243–353.

Guliy, V., Furuta, T., Bilyk N. (2017). Features of REE and Sr distribution in apatite of different genesis from the Aldan Shield (Siberian Platform). *Mineralogical Review*, 67, 2, 3–14.

Hogarth, D.D. (1959). A mineralogical study of pyrochlore and betafite. *PhD Thesis. Montreal, McGill University.*

Hogarth, D.D. (1977). Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*, 62, 403–410.

Lents, D., Suzuki, K. (2001). A low F pegmatite-related Mo skarn from the southwestern Grenville Province, Ontario, Canada: phase equilibria and petrogenetic implication. *Economic Geology*, 95(6), 1319–1337.

Lumpkin, G.R., Ewing, R.C., Williams, C.T., Mariano, A.N. (2001). An overview of the crystal chemistry, durability, and radiation damage effects of pyrochlore from natural systems. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIV*. Pennsylvania: Warrendale Publishers, 663, 921–934.

Pieczka, A. (2010). Primary Nb-Ta minerals in the Szklary pegmatite, Poland: New insights into controls of crystal chemistry and crystallization sequences. *American Mineralogist*, 95(10), 1478–1492.

Pršek, J., Majka, J., Uher, P., Chudík, P. (2010). Niobium-tantalum minerals in the Skoddefjellet NYF granitic pegmatite, Svalbard Archipelago, Norway: Primary versus secondary assemblage. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 187(3), 235–248.

Turner, H.W. (1928). Review of the Radioactive Minerals of Madagascar. *Economic Geology*, 23, 62–84.

References

- Bjorlykke, H. (1937). Mineral parageneses of some granite pegmatites near Kragero, southern Norway. *Norsk Geol. Tidsskr.*, 17, 1–16.
- Bulakh, A.G., Guliy, V.N., Zolotarev, A.A. (1990). Phosphorus Ores in Precambrian Rocks of the Aldan Shield, Leningrad: Publishing House of Leningrad University. [in Russian]
- Camara, F., Williams, C.T., Della Ventura, G., Oberti, R., Caprilli, E. (2004). Non-metamict betafite from Le Carcarelle (Vico volcanic complex, Italy): occurrence and crystal structure. *Mineralogical Magazine*, 68 (6), 939–950.
- Chen, Y.-X., Zheng, Y.-F. (2015). Extreme Nb-Ta fractionation in metamorphic titanite from ultrahigh-pressure metagranite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 150, 53–73.
- Christy, A.G., Atencio, D. (2013). Clarification of status of species in the pyrochlore supergroup. *Mineralogical Magazine*, 77, 13–20.
- Entin, A.R., Kravchenko, S.M., Tian, O.A., Makhotko, V.F. (1987). Betafite-apatite association as a formation indicator of the Seligdar type ores. *Reports of USSR AN*, 293(4), 948–951. [in Russian]
- Entin, A.R., Tian, O.A., Makhotko, V.F., Kravchenko, S.M. (1989). Titanoniobates in the Seligdar type ores. *Soviet Geology*, 2, 83–90. [in Russian]
- Goroshko, M.V., Osypov, A.L., Kirilov, V.E., Solomatin, G. B. (1995). Possibilities of discovery of new kinds of deposits at the Southern-Eastern part of the Aldan Shield. *Pacific Ocean Geology*, 2, 111–118. [in Russian]
- Guliy, V., Furuta, T., Bilyk, N. (2017). Features of REE and Sr distribution in apatite of different genesis from the Aldan Shield (Siberian Platform). *Mineralogical Review*, 67(2), 3–14.
- Guliy, V.N., Wada, H. (2003). Macro- and Micro-variations in the Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Precambrian Carbonates from the Aldan Shield. *Geochemistry International*, 41(5), 431–439.
- Guliy, V.N., Wada, H. (2004). Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of Carbonates from Precambrian Apatite-Bearing Carbonate Rocks of the Aldan Shield. *Lithology and Mineral Resources*, 39(3), 243–353.
- Hogarth, D.D. (1959). A mineralogical study of pyrochlore and betafite. *PhD Thesis. Montreal, McGill University.*
- Hogarth, D.D. (1977). Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*, 62, 403–410.

Kapustin, Yu. L. (1971). Mineralogy of carbonatites. Moscow: Nauka. [in Russian]
Kitsul, V.I., Bogomolova, L.M., Duk, V.L. (1979). Reflection of the Tectonic Structure of the Aldan Shield in Metamorphic and Mineral Facies *Metamorphism of Rocks in the Urals*. Sverdlovsk, 41-46. [in Russian]
Lents, D., Suzuki, K. (2001). A low F pegmatite-related Mo skarn from the southwestern Grenville Province, Ontario, Canada: phase equilibria and petrogenetic implication. *Economic Geology*, 95(6), 1319-1337
Lumpkin, G.R., Ewing, R.C., Williams, C.T., Mariano, A.N. (2001). An overview of the crystal chemistry, durability, and radiation damage effects of pyrochlore from natural systems/ *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIV*. Pennsylvania: Warrendale Publishers, 663, 921-934.
Mineev, D.A., Ilina, O. N., Kravchenko, S.M., et al. (1978). About geochemical features of apatite mineralization of the Seligdar type. *El. VIEMS, Geol., methods of exploration and estimate. Non-ore deposits*, 3, 8-17. [in Russian]
Minerals (1967). Moscow. Nauka, 2(3). [in Russian]
Minerals (1968). Moscow. Nauka, 3(2). [in Russian]
Pieczka, A. (2010). Primary Nb-Ta minerals in the Szklary pegmatite, Poland: New insights into controls of crystal chemistry and crystallization sequences. *American Mineralogist*, 95(10), 1478-1492.
Pršek, J., Majka, J., Uher, P., Chudík, P. (2010). Niobium-tantalum minerals in the Skoddeffjellet NYF granitic pegmatite, Svalbard Archipelago,

Norway: Primary versus secondary assemblage. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 187(3), 235-248.

Pushkarev, Yu.D., Guliy, V.N., Kravchenko, M.P., Ryungenen, G.I. (1989). The Pb and Sr Isotopic compositions of apatite-silicate and carbonate-apatite ore deposits of the Aldan Shield. *XII All-Union Symposium on Stable Isotopic Geochemistry*, Moscow, 10-11. [in Russian]

Radkov, A.V., Molchanov, A.V., Artemev, D.S. et al. (2015). State Geological Map of Russian Federation. Scale 1: 1000 000 (third generation). Aldan-Zabaikale Serie, 0-51 – Aldan list. Explanatory note, St.Petersburg: VSEGEI. [in Russian]

Sakharova, M.S. (1955). Metamorphosed apatite-bearing Archean rocks of the Southern Near Baik. Moscow: *Processing of SICHM*, 70-94. [in Russian]

Turner, H.W. (1928). Review of the Radioactive Minerals of Madagascar. *Economic Geology*, 23, 62-84.

Vinogradov, V.I., Egin, V.I., Kichigin, L.I. et al. (1975). Role of the Lithologic Control of Apatite Mineralization in Archean Rocks of the Aldan Shield (Evidence from Sulfur Isotopic Composition). *Litology i Poleznye Iskopaemye*, 5, 117-127. [in Russian].

Надійшла до редколегії 25.07.18

В. Гулій, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,

E-mail: vgul@ukr.net

І. Побережська, канд. геол.-мінералог. наук, доц.

Н. Білик, асист.

Львівський національний університет імені Івана Франка,

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

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ТА СКЛАДУ БЕТАФІТУ З РІЗНОМАНІТНИХ ФОРМАЦІЙ АЛДАНСЬКОГО ЩИТА (САХА-ЯКУТІЯ)

Описано характер розподілу Nb і Ta у різних геологічних формаціях Алданського щита. Проаналізовано бетафіт еталонних ендеогенних комплексів із відомих об'єктів, пов'язаних із пегматитами, скарнами, карбонатитами, метасоматитами та пізніми жильними утвореннями. Описано структурне положення та мінеральний склад апатитонесних порід Алданського щита і встановлено найбільш масштабні метаморфізовані карбонатні та силікатні різновиди серед них. Апатитова мінералізація у магнезіальних скарнах і метасоматитах розвивається локально.

Головними концентраторами Nb і Ta є бетафіт та титаніт, з якими постійно зустрічається апатит. Бетафіт є звичним у пегматитах поширених у магнезіальних скарнах та метасоматитах щита, але він не виявлений у представницьких апатит-карбонатних породах – рудах селігдарського типу, отже, не може слугувати індикатором цього типу руд.

Пізнні генерації карбонатів суттєво збагачені легкими ізотопами вуглецю і кисню, на відміну від позитивних значень $\delta^{13}\text{C}$ в апатит-карбонатних тілах Селігдарського родовища і споріднених об'єктів та найвищих значень $\delta^{18}\text{O}$. Ці індикатори застосували, щоб відрізнити відмінні за генезисом карбонатні породи, що містять різну кількість бетафіту, поява якого визначається первинним складом вихідних порід. Хімічний склад бетафіту із скарнів та метасоматитів подібний, але виявлено локальні варіації окремих компонентів. Найважливішою рисою хімічного складу мінералу є дуже низький вміст Ta. У той же час титаніту властиві перемінні кількості Nb і Ta як у межах різних ділянок, так і в окремих частинах зерен титаніту.

Ключові слова: бетафіт, титаніт, Nb і Ta, метаморфічні апатит-карбонатні руди, Алданський щит, пегматити, метасоматити, скарни, карбонатити, C–O ізотопи.

В. Гулий, д-р геол.-минералог. наук, проф.,

E-mail: vgul@ukr.net

И. Побережская, канд. геол.-минералог. наук, доц.

Н. Билик, ассист.

Львовский национальный университет имени Ивана Франка,

Геологический факультет, ул. Грушевского, 4, г. Львов, 79005, Украина

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СОСТАВА БЕТАФИТА ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАЦИЙ АЛДАНСКОГО ЩИТА (САХА-ЯКУТИЯ)

Описан характер распределения Nb и Ta в разных геологических формациях Алданского щита. Проанализирован бетафит эталонных эндогенных комплексов из известных объектов, связанных с пегматитами, скарнами, карбонатитами, метасоматитами и поздними жильными образованиями. Описано структурное положение и минеральный состав апатитонесных пород Алданского щита и выявлены наиболее масштабные метаморфизованные карбонатные и силікатные разновидности среди них. Апатитовая минерализация в магнезиальных скарнах и метасоматитах развивается локально.

Главными концентраторами Nb и Ta является бетафит и титанит, с которыми постоянно встречается апатит. Бетафит обычен в пегматитах, распространенных в магнезиальных скарнах и метасоматитах щита, но не обнаружен в представительских апатит-карбонатных породах – рудах селігдарского типа, следовательно, не может служить индикатором этого типа руд.

Поздние генерации карбонатов существенно обогащены легкими изотопами углерода и кислорода, в отличие от положительных значений $\delta^{13}\text{C}$ в апатит-карбонатных телах Селігдарского месторождения и родственных ему объектов и наибольших значений $\delta^{18}\text{O}$. Мы использовали эти индикаторы для выделения различных по генезису карбонатных пород, которые содержат разное количество бетафита, появление которого определяется первичным составом исходных пород. Химический состав бетафита из скарнов и метасоматитов близок, но наблюдаются локальные вариации отдельных компонентов при крайне низком содержании Ta. Для титанита свойственны переменные количества Nb и Ta как в пределах разных участков, так и в отдельных частях зерен титанита.

Ключевые слова: бетафит, титанит, Nb и Ta, метаморфические апатит-карбонатные руды, Алданский щит, пегматиты, метасоматиты, скарны, карбонатиты, C–O изотопы

УДК 549.02:54.027

О. Пушкар'єв, канд. геол.-мінералог. наук,
старш. наук. співроб., пров. наук. співроб.,
E-mail: pushkarevigns@gmail.com

І. Руденко, канд. геол. наук, наук. співроб.,
E-mail: Irina_mihalovna@ukr.net

О. Зубко, наук. співроб.,
E-mail: zhubko@rambler.ru

В. Долін (мол.), інж. I кат.,
E-mail: dolinvitaliy@gmail.com

ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України",
пр. акад. Палладіна, 34-а, м. Київ-142, 03680, Україна

АКТИВАЦІЯ АЗОТНОЮ ТА ГУМІНОВИМИ КИСЛОТАМИ АЛЮМОСИЛІКАТІВ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ АДСОРБЦІЇ ТРИТІЮ З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

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

Актуальною проблемою захисту навколишнього середовища від впливу підприємств паливного ядерно-енергетичного комплексу є пошук ефективних засобів вилучення тритію із промислових стоків. У практиці запобігання забрудненню навколишнього середовища відходами промислової діяльності широко використовуються мінеральні адсорбенти, серед яких значне місце займають бентонітові (монтморилонітові) і палигорські глини та мінерали із групи цеолітів (кліноптилоліти та інші). Для підвищення адсорбційної здатності мінеральних адсорбентів розробляються різного роду методи їх активації. Для визначення ефективності активації адсорбційної здатності таких мінеральних адсорбентів щодо вилучення тритію з водних розчинів виконано серію експериментів, де як активатори використані азотна та гумінові кислоти. У результаті виконаних робіт встановлено, що кислотна активація збільшує вилучення тритію з водних розчинів на 6 % у монтморилоніті і на 52 % у палигорськіті. Додаткова модифікація гуміновою кислотою збільшує вилучення тритію з водних розчинів монтморилонітом ще на 33 % (що загалом становить 39 %), а в палигорськіті на 16 % (загалом 68 %). Активація азотною та гуміновою кислотами кліноптилоліту не виявилась ефективною щодо збільшення вилучення тритію з водних розчинів.

Ключові слова: тритій, водень, важкі ізотопи водню, монтморилоніт, палигорськіт, кліноптилоліт, адсорбція, фракціонування.

Актуальність і важливість запропонованих досліджень визначається сучасним штучним дисбалансом ізотопів водню у біосфері, який збільшуватиметься в умовах розвитку ядерної енергетики. Зокрема, сучасний вміст техногенного тритію в біосфері більш як на порядок перевищує його кількість, утворену з природних джерел. Сучасні умови зберігання тритієвих відходів у приповерхневих сховищах РАО не відповідають вимогам екологічно-радіаційної безпеки та зумовлюють забруднення атмосфери, біогеоценозів, зони аерації, поверхневих вод та підземних водоносних горизонтів. Внаслідок міграції тритійованої води через систему інженерних бар'єрів виникає загроза надходження важких ізотопів водню в організм людини за рахунок споживання питної води. Проблема тритієвого забруднення навколишнього природного середовища з підприємств паливного ядерно-енергетичного комплексу (АЕС, підприємства з переробки відпрацьованого ядерного палива, пункти збереження радіоактивних відходів) зумовлює необхідність розроблення простих, доступних методів іммобілізації тритію.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Як показали наші попередні дослідження, існує група природних речовин, представлених глинистими мінералами та цеолітами, які мають необхідні властивості для утримання тритію у своїй структурі (Пушкар'єв та ін., 2003, 2012, 2014, 2016¹, 2016²; Пушкар'єв та Приймаченко, 2010; Руденко, 2015; Руденко та ін., 2017). Ці мінеральні адсорбенти широко використовуються у хімічній промисловості для очищення скидів від паливно-мастильних матеріалів (Кузєва та ін., 1987), у системі водопостачання для очищення води від домішок (Спосіб адсорбційного очищення питної води. UA 27589) тощо. У світі виконуються ефективні розробки щодо вдосконалення адсорбційних властивостей мінеральних речовин шляхом їх кислотної активації. Кислотна активація бентонітової глини є поширеним способом отримання пористих сорбентів для органічних і неорганічних речовин (Christidis et al., 1997; Eloussaief and Benzina, 2010) та кислотних каталізаторів (Breen and Watson, 1998; Hart and Brown, 2004). Окрім того, кислотна активація зі збереженням шаруватої структури необхідна як початковий етап хімічного модифікування філосилікатів великими

органічними молекулами (Breen and Watson, 1998). Визначення впливу такої модифікації на активацію адсорбції тритію з водних розчинів має важливе значення, враховуючи наростаючий розвиток паливного ядерно-енергетичного комплексу у світі і в Україні. Одним з аспектів цього напряму досліджень є з'ясування можливості та ефективності використання протонних модифікаторів – азотної кислоти (HNO₃) та протонно-гідроксильного розчину гумінової кислоти.

Мета досліджень. Метою досліджень є збільшення адсорбційної здатності шаруватих та каркасних силікатів шляхом їх кислотної модифікації та обробки розчином гумінової кислоти для підвищення ефективності екстракції тритію з водних розчинів.

Матеріали та методи. Кислотна обробка мінерального адсорбенту дозволяє збільшити кількість протон-обмінних груп, що знаходяться на поверхні мінеральних частинок. Очікується, що додавання розчину гумінової кислоти може покращити адсорбційну здатність глинистих мінералів внаслідок додаткового збільшення протон-обмінних центрів на поверхні частинок. Це зумовлено тим, що гумінові кислоти належать до природних поліфункціональних високомолекулярних, в основному поліароматичних, оксикарбонових органічних сполук. Основою їх структури є конденсовані системи, що включають ациклічні й ароматичні кільця, бічні ланцюги і функціональні групи при ядрі та у бічних відгалуженнях (рис. 1). Протон-обмінні групи у гумусовій речовині зазвичай представлені: легко обмінними – карбоксильними (R–COOH), спиртовими (R–CH₂–OH), фенольними (–C₆H₄–OH) та аміногрупами (–NH₂) і важко обмінними – амідними (R–CO–NH₂), альдегідними (R–CHO), карбоксилатними групами та кетонами (R–CO–R). Здатність природної органічної речовини (торфів, вугілля, ґрунтів) накопичувати ряд хімічних елементів пояснюється сорбцією, комплексоутворенням та іонним обміном, у першу чергу, з гуміновими кислотами. Тому передбачалося, що гумінова кислота дозволить модифікувати обмінні канали у мінеральному сорбенті та збільшити їх обмінну ємність, а поверхневі протон-обмінні групи сприятимуть протій-тритієвому обміну з утриманням важкого ізотопу водню в OH-групах.

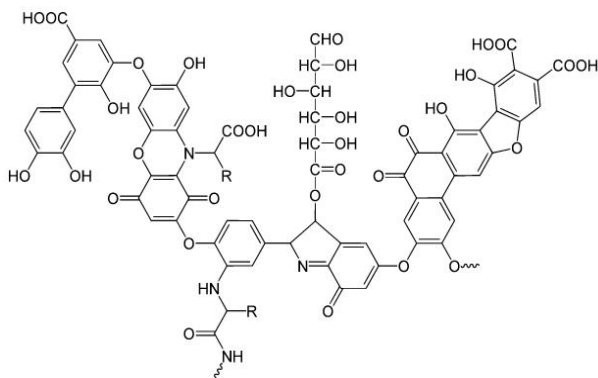


Рис. 1. Структурна формула гумінової кислоти (Руденко, 2015)

Експерименти виконувались у стаціонарних умовах для забезпечення можливості визначення балансу і ефективності міжфазового перерозподілу тритію в системах "мінеральний адсорбент – тритійована вода". Поверхнево модифіковані мінерали поміщались у скляні посудини, які заливались тритійованою водою (НТО) і герметично закривались для запобігання обміну експериментальних систем з повітрям. Експерименти тривали до досягнення рівноважної концентрації тритію в системах. По їх завершенні з водної фази відбиралися проби, які, після очищення від органічних домішок (окиснення додаванням до розчину $K_2Cr_2O_7$) та дистиляції, змішувалися із сцинтилятором Hi Sife 3 Wallac у співвідношенні 8:12. Для визначення можливого фракціонування ізотопів водню між різними структурними позиціями у модифікованих мінералах, мінеральний адсорбент нагрівався при відповідних температурах для виділення фракцій вологи (поверхнево-адсорбованої, міжшарової або каналної та міцно-зв'язаної в ОН-групах) (Руденко, 2017).

Для створення експериментальних систем, щодо визначення впливу модифікаторів на адсорбційні властивості мінеральних адсорбентів, було обрано три мінерали: шаруваті силікати з Черкаського родовища – монтморилоніт зі структурним типом 2:1 і палигорськіт зі стрічково-каналною структурою та каркасний алюмосилікат – кліноптилоліт Сокирницького родовища. (Пушкар'єв та ін., 2003, 2012; Пушкар'єв та Приймаченко, 2010; Руденко та ін., 2017).

Експерименти складалися з двох серій. У першій серії мінеральна маса лише оброблялася азотною кислотою (HNO_3). У другій серії адсорбент додатково модифікувався розчином гумінової кислоти.

Підготовка вихідної мінеральної маси для експериментальних систем складалася з таких стадій:

1. Мінеральний адсорбент промивали азотною кислотою (HNO_3) до рівноважного насичення H^+ -іонами, після чого промивали дистилятом з 6-кратною декантацією до досягнення рН-розчином рівня 3–4.

2. Мінеральна маса осушувалася для звільнення від поверхнево адсорбованої води, шляхом нагріву при $110^\circ C$ протягом 5 годин, щоб уникнути розбавлення тритійованої води при її наступній взаємодії з адсорбентом.

Розчин гумінової кислоти готували таким чином:

1. Просушували при $105^\circ C$ порошкоподібну буровугільну гумінову кислоту.

2. Готували півмолярний розчин НТО з попередньо зневодненим при $200^\circ C$ Na_2CO_3 . До підготовленого лужного розчину НТО додавали наважку просушеної гумінової кислоти для отримання 1 %-розчину.

Для створення першої серії експериментальних систем оброблені кислотою мінеральні адсорбенти заливали тритійованою водою у співвідношенні $100\text{ см}^3/300\text{ мл}$. Для другої серії експериментів до аналогічно оброблених

мінеральних адсорбентів об'ємом 100 см^3 додавали розчини 80 мл 1 %-гумінової кислоти та 220 мл НТО.

Вміст тритію в підготовлених таким чином емульсіях визначався за допомогою рідинного сцинтиляційного β -спектрометра Quantulus 1220 (LKW Wallac) з похибкою виміру не більше $\pm 5\%$.

Результати експериментів та їх обговорення. Для отримання зіставної оцінки ефективності модифікації мінеральних адсорбентів розраховано два показники: питомий запас тритію в одиниці маси мінералу (Q_m) та коефіцієнт фракціонування ізотопів водню (α) за виразами (1) і (2):

$$Q_m = Q_w - Q_f, \quad (1)$$

де Q_m – питомий запас тритію в одиниці маси мінералу, $Bкxг^{-1}$; Q_w та Q_f – запас тритію в НТО до та після експерименту, $Bк$; m – маса адсорбенту, $г$:

$$\alpha = \frac{T_m}{H_m} / \frac{T_w}{H_w}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт фракціонування ізотопів водню, T_m , H_m – концентрація атомів тритію і протію у мінеральній масі, $атомxмл^{-1}$; T_w , H_w – концентрація атомів тритію і протію в НТО, $атомxмл^{-1}$ після досягнення рівноважного стану в системі "мінеральний адсорбент – НТО".

Показник питомого запасу тритію дає змогу виконувати розрахунки адсорбційної ємності для різних мас мінерального адсорбенту. В умовах закритих експериментальних систем ця величина обчислюється як різниця запасу тритію в тритійованій воді до і після її взаємодії з мінералом, віднесена до маси адсорбенту (1). Розподіл тритію, що потрапив у структуру мінералів, між різними структурними позиціями може супроводжуватися ізотопно-водневим фракціонуванням, для оцінки якого використано коефіцієнт фракціонування α (2) згідно з (Несмеянов, 1972). Ефективність модифікації мінеральних адсорбентів щодо адсорбції тритію з водних розчинів та ізотопно-водневого фракціонування оцінена відносно ідентичних необроблених мінералів за виразом (3):

$$q = \frac{(Q_i - Q_0)}{Q_0} \quad (3)$$

де q – ступінь впливу модифікації на питомий запас тритію в мінеральній масі, $\%$; Q_0 – питомий запас тритію у необробленому мінералі, $Bкxг^{-1}$; Q_i – питомий запас тритію у модифікованому мінералі, $Bкxг^{-1}$.

Отримані результати щодо ефективності модифікації мінеральних адсорбентів містяться у таблиці 1.

У макромолекулярних пакетах монтморилоніту, який належить до групи мінералів типу 2:1, між двома гексагональними сітками алюміній-кремній-кисневих тетраедрів розташована одна октаедрична алюміній-киснево-гідроксильна сітка (Дур, 1966). У такому центральному шарі з кожних трьох октаедрів лише два заселені трьохвалентними катіонами (Al^{3+} , Fe^{3+}), які впорядковано чергуються з вакантними октаедрами. Верхні та нижні поверхні елементарних пакетів монтморилоніту вкриті атомами кисню, тому зв'язок між пакетами слабкий, де діють лише Ван-дер-Ваальсові міжмолекулярні сили. Часткове ізоморфне заміщення іонів Al^{3+} іонами Mg^{2+} , (Fe^{2+}) і, меншою мірою, іонів Si^{4+} іонами Al^{3+} призводить до виникнення структурного негативного заряду, який компенсується обмінними катіонами. Між шарами пакетів, тобто в міжшаровому просторі, містяться молекули води та обмінні катіони лужних та лужноземельних елементів. Вода в монтморилонітах легко адсорбується між пакетами у вигляді цілого числа заповнених шарів молекул з одночасною зміною параметрів решітки по осі "с" від $9,6$ до $12,5\text{--}28\text{ \AA}$ (Лазаренко, 1971; Тарасевич и Овча-

ренко, 1975) та легко видаляється з поміж пакетів. Кількість таких шарів і, відповідно, параметри решітки деякою мірою визначаються природою міжшарового обмінного катіонного комплексу.

У результаті кислотної обробки монтморилоніту відбувається вилугування з міжшарового простору гідратованих катіонів лужних та лужноземельних металів.

Після контакту тритійованої води із зневодненою поверхнею кислотного обробленого монтморилоніту вакантні катіонні позиції заповнюються протонами, гідратованими молекулами НТО. Такий процес зумовлює накопичення в мінеральному адсорбенті до 6 % тритію (табл. 1).

Таблиця 1

Питомий запас тритію в одиниці маси мінералу (Q_m) та коефіцієнт фракціонування ізотопів водню (α) за різних умов модифікації

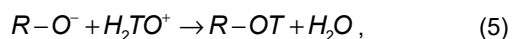
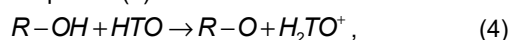
Мінерал	Питомий запас тритію в мінеральній масі, Бк/г	q, %	Коефіцієнт фракціонування (α)
<i>Монтморилоніт</i>			
необроблений	8,075	-	1,2
промийтий розчином HNO_3	8,56	6	1
промийтий розчином HNO_3 з додаванням гумінової кислоти	11,22	39	1,03
<i>Палигорськіт</i>			
необроблений	6,6	-	1,02
промийтий розчином HNO_3	10,1	52	0,95
промийтий розчином HNO_3 з додаванням гумінової кислоти	11,5	68	1,02
<i>Цеоліт</i>			
необроблений	4,03	-	1,01
промийтий розчином HNO_3	3,94	-2	0,87
промийтий розчином HNO_3 з додаванням гумінової кислоти	4,04	0	0,97

В палигорськіті під час обробки азотною кислотою молекули води, координаційно зв'язаної зі стінками каналів, заміщуються нітратними групами. Число гідратації таких груп дорівнює 6 (Ерден-Груз, 1930). При взаємодії кислотного обробленого палигорськіту з тритійованою водою у гідратованих оболонках нітратних груп, молекули H_2O заміщуються молекулами НТО, що забезпечує накопичення тритію до 52 % (табл. 1).

На стінках структурних каналів цеоліту розміщуються обмінні катіони лужних та лужноземельних елементів, з якими координовані молекули води (Armbruster and Gunter, 2001; Breck, 1974). Кислотна обробка цеоліту може зумовити часткове вилучення цих катіонів, що компенсують поверхневий негативний заряд кремній-кисневих тетраедрів. Внаслідок чого утворюються центри гідратованих протонів із утримуючою здатністю значно меншою, ніж у заміщених катіонів і, відповідно, з меншою можливістю до координаційно-приповерхневого зв'язування молекул НТО з тритійованої води (табл. 1).

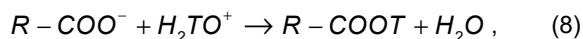
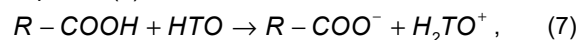
Взаємодія розчину гумінової кислоти з монтморилонітом відбувається за рахунок електростатичних та ковалентних зв'язків. Адсорбовані на поверхні частинки монтморилоніту макромолекули гумінової кислоти містять у своєму складі значну кількість обмінних груп ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $=\text{NH}$ та $-\text{NH}_2$), внаслідок чого створюється додаткова кількість обмінних центрів (рис. 2.). Ці групи легко обмінюються з дисоційованими молекулами тритійованої води ($\text{HTO} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{TO}^-$; $\text{HTO} \leftrightarrow \text{T}^+ + \text{OH}^-$) за механізмом протонно-третонного обміну.

В органічних сполуках за участю спиртових і фенольних гідроксильних груп ізотопний обмін відбувається згідно з виразами (4, 5) з константою дисоціації обмінних груп згідно з виразом (6):



$$K_a = \frac{[R-\text{O}^-][\text{H}_2\text{TO}^+]}{[R-\text{OH}]}. \quad (6)$$

В органічних сполуках за участю аліфатичних та ароматичних карбонових кислот (Лурье, 1971) ізотопний обмін відбувається також за катіонним механізмом згідно з виразами (7, 8) з константою дисоціації обмінних груп згідно з виразом (9):



$$K_a = \frac{[R-\text{CO}_2^-][\text{H}_2\text{TO}^+]}{[R-\text{CO}_2\text{H}]}. \quad (9)$$

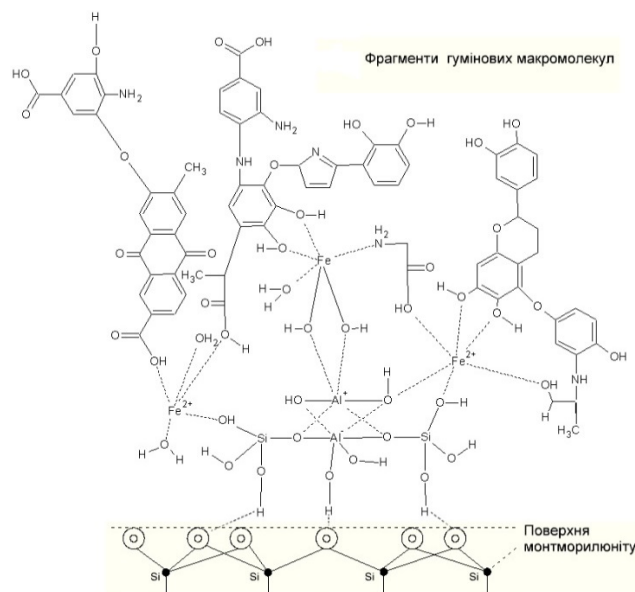
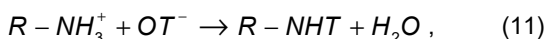
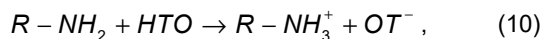
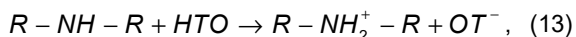


Рис. 2. Взаємодія гумінових комплексів з поверхнею монтморилоніту

У випадку аміно- та іміно-груп ізотопний обмін відбувається за аніонним механізмом згідно з виразами (10, 11, 13, 14) з константою дисоціації обмінних груп згідно з виразами (12, 15):



$$K_a = \frac{[R - NH_3^+][OT^-]}{[R - NH_2]}, \quad (12)$$



$$K_a = \frac{[R - NH_3^+ - R][OT^-]}{[R - NH - R]}. \quad (15)$$

Цілком імовірно, що саме вищенаведені механізми забезпечують зростання адсорбційної здатності монтморилоніту і збільшення питомого запасу тритію в мінеральній масі на 39 % (табл. 1).

У палигорськіті, який також належить до шаруватих силікатів, модифікація гуміною кислотою відбувалася подібно до монтморилоніту. Згідно з (Österberg et al., 1993) розміри макромолекул гумінової кислоти перевищують 100 нм, в той час, як розміри каналів у палигорськіті не перевищують 0,92–0,94 нм по висоті та близько 1,2 нм по ширині (Тарасевич, 1988). Оскільки макромолекули гумінової кислоти значно перебільшують розміри каналів палигорськіту їх модифікуюча здатність реалізується лише шляхом взаємодії з поверхнею мінеральних частинок. Внаслідок цього додаткове збільшення адсорбційної здатності мінералу порівняно з кислотною обробкою склало 16 % та, загалом, у комбінації з попередньою кислотною обробкою – 68 % (табл. 1).

Взаємодія гумінової кислоти з кліноптилолітом зумовлюється його структурними особливостями. У структурі цього каркасного, жорстко структурованого алюмо-силікату є три типи каналів, які утворюють двомірну систему. Канали першого типу з розміром вікон 4,0–5,6 нм розташовані паралельно осі а у 8-членних кільцях. Канали другого типу з розміром вікон 4,4–7,2 нм проходять паралельно осі с у 10-членних кільцях. Канали третього типу з розміром вікон 4,1–4,7 нм орієнтовані під кутом 50° до осі а у 8-членних кільцях. Розмір макромолекул гумінових кислот значно перевищує розмір каналів у цеоліті. Тому для кліноптилоліту можлива лише поверхнева модифікація гуміновими кислотами, яка не збільшує адсорбційної здатності мінералу і, відповідно, не збільшує зв'язування молекул НТО (табл. 1).

Слід відзначити, що кислотна обробка і модифікація гуміною кислотою монтморилоніту, палигорськіту та кліноптилоліту не супроводжується збільшенням ефекту ізотопно-водневого фракціонування (табл. 1).

Висновки

1. При взаємодії тритійованої води із зневодненою поверхнею кислотної обробленого монтморилоніту, вакантні катіонні позиції заповнюються протонами, гідратованими молекулами НТО, що зумовлює накопичення в мінеральному адсорбенті до 6 % тритію.

2. У палигорськіті у результаті обробки азотною кислотою молекули води, що координаційно зв'язані зі стінками каналів заміщуються нітратними групами, число гідратації яких дорівнює 6. Заміщення молекул H₂O у гідратованих оболонках нітратних груп молекулами НТО забезпечує збільшення вмісту тритію в мінералі на 52 %.

3. При кислотній обробці цеоліту відбувається заміщення обмінних катіонів лужних та лужноземельних елементів, координованих зі стінками каналів гідратованими протонами із утримуючою здатністю значно меншою, ніж у заміщених катіонів і, відповідно, з меншою можливістю

до координаційно-приповерхневого зв'язування молекул НТО з тритійованої води.

4. Модифікація глинистих мінералів гуміною кислотою змінює їх адсорбційну здатність відповідно до їх структурних особливостей. Обмінні групи гумінової кислоти створюють більшу додаткову кількість поверхневих обмінних центрів у розбухаючому монтморилоніті, ніж у більш жорстко консолідованому палигорськіті. Внаслідок цього у монтморилоніті модифікація гуміною кислотою додатково збільшує адсорбційну здатність і, відповідно, накопичення тритію з тритійованої води на 33 % із загальних 39 %. У палигорськіті таке збільшення становить лише 16 % (із загальних 68 %).

5. У цеоліті активація гуміною кислотою не призводить до збільшення адсорбційної здатності мінералу і, відповідно, до збільшення здатності екстрагувати тритій із тритійованої води.

6. В активованих азотною та гуміною кислотами монтморилоніті, палигорськіті та цеоліті не встановлено знакового збільшення фракціонування ізотопів водню.

Список використаних джерел

- Дир, У.А., Хауи, Р.А., Зусманн, Дж. (1966). Пороодообразующие минералы. М.: Мир.
- Куваева, М. М., Гончарова, Т. В., Совозо, М. Ш. и др. (1987). Получение адсорбентов из палигорскитовых глин. *Химия и технология топлив и масел*, 5, 13–15.
- Лазаренко, Е.К. (1971). Курс минералогии. М.: Высшая школа.
- Лурье, Ю.Ю. (1971). Справочник по аналитической химии. М.: Химия.
- Несмеянов, А.Н. (1972). Радиохимия. М.: Химия.
- Пушкарёв, О. В., Руденко, І. М., Долін, В. В. (мол.), Приймаченко, В. М. (2014). Сепіоліт-цеолітові композити як потенційні водопроникні бар'єри. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 23, 75–84.
- Пушкарёв, О.В., Руденко, І.М., Кошелев, М.В., Скрипкін, В.В., Долін, В.В. (мол.), Приймаченко, В.М. (2016). Мінеральний адсорбент тритію на основі сапоніту та цеоліту. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 25, 38–48.
- Пушкарёв, О.В., Приймаченко, В.М., Золкін, І.О. (2012). Властивості бентоніто-цеолітових композитів щодо вилучення тритію з тритієвої води. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 20, 98–108.
- Пушкарёв, О.В., Руденко, І.М., Скрипкін, В. В. (2016). Адсорбція тритія із водних розтворів термічески обробленими глинистими мінералами. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 71, 43–48.
- Пушкарёв, О.В., Литовченко, А.С., Пушкарёва, Р.О., Яковлев, Е.О. (2003). Динаміка накопичення тритію в мінеральному середовищі. *Мінеральні ресурси України*, 3, 42–45.
- Пушкарёв, О.В., Приймаченко, В.М. (2010). Взаємодія тритієвої води з глинистими мінералами. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 18, 149–158.
- Руденко, І.М. (2015). Покращення акумуляції тритію в водопроникних реакційних бар'єрах. *Вісник БрГУ*, 2, 87–93.
- Руденко, І.М. Пушкарёв, О.В., Долін, В.В. (мол.), Зубко, О.В., Гречановська, О.Є. (2017). Тритієвий індикатор ефективності термомодифікації адсорбційних властивостей кліноптилоліту. *Мінералогічний журнал*, 39 (2), 64–74.
- Руденко, І.М. (2017). Фракціонування важких ізотопів водню в системі мінерал – вода. *Дис. ... канд. геол. наук*: 04.00.02. Київ.
- Тарасевич, Ю. И. (1988). Строение и химия поверхности слоистых силикатов. Киев: Наукова думка.
- Тарасевич, Ю.И., Овчаренко, Ф.Д. (1975). Адсорбция на глинистых минералах. Киев: Наукова думка.
- Эрден-Груз, Т. (1976). Явления переноса в водных растворах. М.: Мир.
- Armbruster, T., Gunter, M.E. (2001). Crystal structures of natural zeolites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45, 1–61.
- Breck, D.W. Zeolite (1974). Molecular sieves. Structure, chemistry and use. N.Y., London, Sydney, Toronto.
- Breen, C. Watson, R. (1998). Acid-activated organoclays: preparation, characterization and catalytic activity of polycation-treated bentonites. *Appl. Clay Sci.*, 12, 479–494.
- Christidis, G.E. Scott, P.W., Dunham, A.C. (1997). Acid activation and bleaching capacity of bentonites from the islands Milos and Chios, Aegean, Greece. *Appl. Clay Sci.*, 12, 4, 329–347.
- Eloussaief, M. (2010). Efficiency of natural and acid-activated clays in the removal of Pb (II) from aqueous solutions. *J. of Hazard. Mat.*, 178, 753–757.
- Hart, M.P. Benzina, M. (2004). Surface acidities and catalytic activities of acid-activated clays. *J. of Molecular Catalysis A: Chemical*, 212, 315–3.
- Österberg, R., Lindqvist, I., Mortensen, K. (1993). Particle size of humic acid. *Soil Science Society of America. Journal*, 57, 283–285.

References

- Armbruster, T., Gunter, M.E. (2001). Crystal structures of natural zeolites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45, 1–61.

Breck, D.W. Zeolite (1974). Molecular sieves. Structure, chemistry, and use. N.Y., London, Sydney, Toronto.

Breen, C., Watson, R. (1998) Acid-activated organoclays: preparation, characterization and catalytic activity of polycation-treated bentonites. *Appl. Clay Sci.* 12, 479-494.

Christidis, G.E. Scott, P.W., Dunham, A.C. (1997). Acid activation and bleaching capacity of bentonites from the islands Milos and Chios, Aegean, Greece. *Appl. Clay Sci.* 12, 4, 329-347.

Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J. (1966). Pore-forming minerals. Moscow: Mir. [in Russian]

Eloussaief, M. (2010). Efficiency of natural and acid-activated clays in the removal of Pb (II) from aqueous solutions. *J. of Hazard. Mat.*, 178, 753-757. DOI:10.1016/j.jhazmat.2010.02.004

Erden-Gruz, T. (1976). Transport phenomena in aqueous solutions. Moscow: Mir. [in Russian]

Hart, M.P. Benzina, M. (2004). Surface acidities and catalytic activities of acid-activated clays. *J. of Molecular Catalysis A: Chemical*, 212, 315-3. DOI: 10.1016/j.molcata.2003.11.013.

Kuvaeva, M. M., Goncharova, T. V., Sovozu, M. Sh. et. al (1987). Obtaining adsorbents from palygorskite clays. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 5, 13-15. [in Russian]

Lazarenko, E.K. (1971). Course of Mineralogy. Moscow: Vysshaya shkola. [in Russian]

Lure, Yu.Yu. (1971). Reference book on analytical chemistry. Moscow: Himiya. [in Russian]

Nesmeyanov, An.N. (1972). Radiochemistry. Moscow: Himiya. [in Russian]

Österberg, R., Lindqvist, I., Mortensen, K. (1993). Particle size of humic acid. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 283-285.

Pushkarov, O.V., Rudenko, I.M., Koshelev, M.V., Skripkin, V.V., Dolin, V.V. (Jr.), Prymachenko, V.M. (2016). Mineral adsorbent of tritium based on saponite and zeolite. *Collected scientific papers of Institute of environmental geochemistry*, 25, 38-48. [in Ukrainian]

Pushkarov, O.V., Prymachenko, V.M., Zolkin, I.O. (2012). Bentonite-zeolite composites' properties with respect to tritium extraction from tritium water. *Collected scientific papers of Institute of environmental geochemistry*, 20, 98 -108. [in Ukrainian]

Pushkarov, O.V., Rudenko, I.M., Skripkin, V. V. (2016). Adsorption of tritium from aqueous solutions of treated clay minerals. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 71, 43-48. [in Russian]

Pushkarov, O.V., Rudenko, I.M., Dolin, V.V. (Jr.), Prymachenko, V.M. (2014). Sepiolite-zeolite composites as a potential reactivity waterproof barriers. *Collected scientific papers of Institute of environmental geochemistry*, 23, 98-107. [in Ukrainian]

Pushkarov, O.V., Lytovchenko, A.S., Pushkarova, R.O., Yakovliev, E.O. (2003) The dynamics of the accumulation of tritium in the mineral environment. *Mineral resources of Ukraine*, 3, 42-45. [in Ukrainian]

Pushkarov, O.V., Prymachenko, V.M. (2010). Interaction between hto and clay minerals. *Collected scientific papers of institute of environmental geochemistry*, 18, 149 -158. [in Ukrainian]

Rudenko, I.M. (2015). Improving the Accumulation of Tritium in Water Reactive Barriers. *Vesnik BrSU*, 2, 87-93. [in Russian]

Rudenko, I.M. (2017). Fractionation of heavy hydrogen isotopes in the "mineral – water" system. *PhD thesis*. Kyiv. [in Ukrainian]

Rudenko, I.M., Pushkarov, O.V., Dolin, V.V. (Jr.), Zubko, O.V., Hrechynska, O.Ie. (2017). Tritium indicator of effectiveness of thermomodification of adsorption properties of clinoptilolite. *Miner. J.*, 39 (2), 64-74. [in Ukrainian]

Tarasevich, Yu. I. (1988). The structure and chemistry of the surface of layered silicates. Kiev: Naukova dumka. [in Russian]

Tarasevich, Yu.I., Ovcharenko, F.D. (1975). Adsorption on clay minerals. Kiev: Naukova dumka. [in Russian]

Надійшла до редколегії 29.08.18

V. Pushkarev, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Leading Researcher,
E-mail: pushkarevigns@gmail.com

I. Rudenko, Cand. Sci. (Geol.), Researcher,
E-mail: Irina_mihalovna@ukr.net

O. Zubko, Researcher,
E-mail: zhubko@rambler.ru

V. Dolin (Jr.), Engineer,
E-mail: dolinvitaliy@gmail.com

SE "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine",
34-a Acad. Palladin Ave., Kyiv-142, 03680, Ukraine

NITROGEN AND HUMIC ACID ACTIVATION OF ALUMOSILICATES FOR IMPROVING THE ADSORPTION OF TRITIUM FROM WATER SOLUTIONS

The urgent problem of protecting the environment from the impact of enterprises of the fuel nuclear power complex is the search for effective means to localize tritium from industrial wastewater. In the practice of preventing environmental pollution with industrial waste, mineral adsorbents, among which a significant place is occupied by bentonite (that is, montmorillonite) and palygorskite clays and minerals from the group of zeolites (clinoptilolites and others) are widely used. To increase the adsorption capacity of mineral adsorbents, various methods for their activation are being developed. To assess the effectiveness of the activation of the adsorption capacity of such mineral adsorbents on the removal of tritium from aqueous solutions, a series of experiments was performed, where nitric and humic acids were used as activators. As a result of the work performed, it was found that acid activation increases the removal of tritium from aqueous solutions by 6% in montmorillonite and 52% in palygorskite. A further modification with humic acid, respectively, increases the removal of tritium from aqueous solutions by montmorillonite by an additional 33% (39% in total) and in palygorskite by 16% (68% in total). Activation of clinoptilolite by nitric and humic acids was not effective in increasing the extraction of tritium from aqueous solutions.

Keywords: tritium, hydrogen, heavy isotopes of hydrogen, montmorillonite, palygorskite, clinoptilolite, adsorption, fractionation.

A. Пушкарёв, канд. геол.-минералог. наук, старш. науч. сотр.,
вед. науч. сотр.,

E-mail: pushkarevigns@gmail.com

И. Руденко, канд. геол. наук, науч. сотр.,
E-mail: Irina_mihalovna@ukr.net

А. Зубко, науч. сотр.,
E-mail: zhubko@rambler.ru

В. Долин (мл.), инж. I кат.,
E-mail: dolinvitaliy@gmail.com

ГУ "Институт геохимии окружающей среды НАН Украины",
Пр. Акад. Палладина, 34-а, г. Киев-142, 03680, Украина

АКТИВАЦИЯ АЗОТНОЙ И ГУМИНОВЫМИ КИСЛОТАМИ АЛЮМОСИЛИКАТОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ АДсорбЦИИ ТРИТИЯ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Актуальной проблемой защиты окружающей среды от воздействия предприятий топливного ядерно-энергетического комплекса является поиск эффективных средств локализовать тритий из промышленных стоков. В практике предотвращения загрязнения окружающей среды отходами промышленной деятельности широко используются минеральные адсорбенты, среди которых значительное место занимают бентонитовые (монтмориллонитовые) и палигорскитовые глины, а также минералы из группы цеолитов (клиноптилолиты и другие). Для повышения адсорбционной способности минеральных адсорбентов разрабатываются различного рода методы их активации. Для определения эффективности активации адсорбционной способности таких минеральных адсорбентов по извлечению трития из водных растворов выполнена серия экспериментов, где в качестве активаторов использованы азотная и гуминовые кислоты. В результате выполненных работ установлено, что кислотная активация увеличивает извлечение трития из водных растворов на 6 % в монтмориллоните и на 52 % в палигорските. Дополнительная модификация гуминовой кислотой увеличивает извлечение трития из водных растворов монтмориллонитом еще на 33 % (что, в общем, составляет 39 %) и в палигорските на 16 % (всего 68 %). Активация азотной и гуминовой кислотами клиноптилолита не оказалась эффективной для увеличения экстракции трития из водных растворов.

Ключевые слова: тритий, водород, тяжелые изотопы водорода, монтмориллонит, палигорскит, клиноптилолит, адсорбция, фракционирование.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.832+550.834

А. Назаревич, канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.,
ORCID-0000-0002-1989-0790

E-mail: nazarevych.a@gmail.com

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
вул. Наукова, 3-б, м. Львів, 79060, Україна

Л. Назаревич, канд. геол. наук, наук. співроб.,

ORCID-0000-0001-8038-9535

E-mail: nazarevych.L@gmail.com

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
відділ сейсмічності Карпатського регіону,

вул. Ярославенка, 27, м. Львів, 79012, Україна

М. Баштевич, пров. програміст,

E-mail: nbash@ukr.net

Львівський регіональний центр з гідрометеорології,
вул. Чупринки, 58А, м. Львів, 79044, Україна**ВИДІЛЕННЯ МАЛОАМПЛІТУДНИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ АНОМАЛІЙ –
ПРОВІСНИКІВ МІСЦЕВИХ ЗАКАРПАТСЬКИХ ЗЕМЛЕТРУСІВ
З УРАХУВАННЯМ МЕТЕОТЕРМОПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ***(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Б.П. Масловим)*

Метою статті є представлення методики дослідження і редукції метеотермопружних деформацій із деформографічних даних і результатів виділення, з її застосуванням, малоамплітудних деформаційних аномалій – провісників місцевих Закарпатських землетрусів.

Вивчення метеотемпературних впливів на дані режимних геофізичних спостережень і розробка способів урахування таких впливів є одним із важливих завдань при проведенні геодинамічного моніторингу. Особливо актуальним це є для деформографічних досліджень.

Методика досліджень полягала у проведенні кореляційного аналізу деформографічних та метеотемпературних даних і редукції виявлених сезонних метеотермопружних деформацій із варіаційних деформографічних рядів. У результаті таких досліджень, зокрема, вивчено кореляцію між температурою повітря і деформаціями масиву порід на пункті спостережень "Мужієво" (Українське Закарпаття) і шляхом редукції виявлених сезонних метеотермопружних деформацій виділено малоамплітудну деформаційну аномалію – провісник місцевого Закарпатського землетрусу з магнітудою $M=3,3$ на епіцентральної відстані 31 км.

Виділена аномалія має амплітуду (у відносних деформаціях) $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ (у порівнянні з величиною сезонних метеотермопружних варіацій $\sim 14 \cdot 10^{-7}$) і є у 5–7 разів більшою за амплітуди різницевих флуктуацій ($0,5\text{--}0,7 \cdot 10^{-7}$) між зареєстрованими варіаціями деформацій і "стаціонарною" сезонною метеотермопружною хвилею, "провісникова" тривалість аномалії становить близько 5 місяців.

Практична значущість роботи полягає в тому, що застосування розробленої методики забезпечує редукцію метеотемпературних впливів на порядок і більше і дає можливість пошуків малоамплітудних деформаційних аномалій – провісників землетрусів на фоні термопружних деформацій, що, фактично, у багато разів збільшує реальну чутливість і, відповідно, зону геодинамічного та сейсмопрогностичного контролю конкретного пункту деформографічних спостережень.

Ключові слова: сейсмопрогностичні дослідження, деформації порід, метеотемпературний вплив, термопружна деформація, аномалія – провісник землетрусу, Українське Закарпаття.

Постановка проблеми. Одним із важливих завдань при проведенні геодинамічного моніторингу є вивчення метеотемпературних впливів на дані режимних геофізичних спостережень і розробка способів урахування таких впливів. Адже ігнорування цих впливів може спричинити неправильну інтерпретацію реєстрованих варіацій геофізичних полів. Стосовно сейсмопрогностичних досліджень, можлива як, так звана хибна тривога (аномалія, спричинена метеотемпературним впливом, приймається за провісник землетрусу), такі і "пропуск цілі" (аномалія – провісник землетрусу, приймається за спричинену (або маскується) метеотемпературним впливом).

Особливо актуальним це є для деформографічних спостережень. За рахунок високої чутливості деформографічної апаратури (на рівні $10^{-8}\text{--}10^{-9}$ у відносних одиницях, або десятків – сотень нанометрів в абсолютних одиницях) вплив варіацій температури повітря (через її вплив на апаратуру) чи термопружних деформацій масиву порід на результати вимірювань є значним, він перебуває на рівні припливних складових деформацій порід (до сотень нанометрів або до $1\text{--}5 \cdot 10^{-8}$ у відносних деформаціях) для добових варіацій і на рівні тектонічних рухів (до одиниць і десятків мкм або до $5\text{--}20 \cdot 10^{-7}$ у відносних деформаціях) для більш тривалих (від кількох днів до сезонних) змін деформацій, навіть у достатньо добрих умовах спостережень у підземних виробках.

Аналіз останніх досліджень та публікацій за темою роботи. З температурним впливом на результати деформографічних сейсмопрогностичних досліджень дослідники борються вже давно (Латынина і др., 1988). Одним з ефективних способів такої боротьби є заглиблення точок спостережень у межі термостабільного шару – на глибини понад 15–20 м, тобто розташування деформографічної апаратури у гірничих виробках – шахтах і штольнях (Латынина і др., 1988, 1992; Nazarevych et al., 2010). Належне облаштування таких пунктів спостережень (влаштування кількох теплоізоляційних шлюзів на вході) забезпечує у них стабільний температурний режим (добові варіації температури на рівні менше $0,01^\circ\text{C}$, а сезонні – менше $0,5^\circ\text{C}$), що дає змогу мінімізувати безпосередній вплив температури і локальних метеотермопружних впливів на породи і апаратуру до прийнятних величин (Латынина і др., 1988). Але такі готові і незайняті гірничі виробки, придатні для деформографічних спостережень, трапляються дуже нечасто, а спеціальне їх створення є дуже дорогим.

Інший підхід до вирішення цієї проблеми – проведення температурного моніторингу на пункті деформографічних спостережень з подальшим дослідженням і редукцією виявлених метеотемпературних впливів. Часто цей підхід використовується разом з першим, зокрема і нами, при проведенні деформографічних досліджень у Закарпатті (Назаревич, 2006, 2008, 2010, 2011а, 2011б,

2012, 2013; Назаревич та Назаревич, 1999; Назаревич та Мукіта, 2010). Але оскільки шляхи проникнення температурних впливів є різні – на масив порід (від денної поверхні через породи і через повітря у гірничу виробку у зону деформографів), на апаратуру, то задача редукції таких впливів є нетривіальною і вимагає у кожному випадку своїх підходів з урахуванням конкретних умов досліджень.

Для порівняння зазначимо, що метеотемпературні впливи і термопружні деформації, поряд з іншими факторами, враховуються також і при відомих найновіших дослідженнях гравітаційних хвиль за допомогою комплексів LIGO (Lazer..., 2018), позаяк вимірювальні системи у них є фактично аналогами суперчутливих лазерних інтерферометрів-деформографів (Nazarevych et al., 2010). Значно полегшується це завдання тут тим, що шукані гравітаційні хвилі лежать у діапазоні звукових частот, де термопружні деформації, внаслідок інерційності теплових процесів, є малими.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Оскільки термопружні деформації (особливо, сезонна складова) генеруються по всій площі приповерхневих шарів порід, прилеглих до пунктів спостережень, на глибинах 1–5–10 м, тобто там, де амплітуда сезонної температурної хвилі ще досить велика (10–4–2 °C відповідно), а самі породи вже досить консолідовані і передають такі деформації значно далі (на десятки і сотні метрів в глибоку масиву порід), ніж проникає сама метеотемпературна хвиля (до 15–20 м), задача їх врахування є актуальною навіть для досить глибоко (на 50–100 м від денної поверхні) розташованих у гірничих виробках пунктів спостережень і водночас непростою (Латынина і др., 1988; Nazarevych et al., 2010; Назаревич, 2011а). Тим більше, така задача є актуальною для даних деформографічного пункту "Мужієво" у Закарпатті (заглибленого всього на 15–20 м) (Латынина і др., 1992; Назаревич, 2011а, 2011б), де дані локального температурного моніторингу під час проведення деформографічних досліджень відсутні.

Дослідження на пункті "Берегове-1" ("Мужієво") проводились Л.О. Латыніною та І.М. Байсаровичем (Латынина і др., 1992). Сама деформографічна станція (географічні координати $\varphi=48,2^\circ$, $\lambda=22,7^\circ$) розташовувалась у розвідувальній штольні № 22 (Латынина і др., 1992; Назаревич, 2011а, 2011б), на південному схилі гори Мужіївської (Великої Берегівської) у підніжжі її вершинного купола, за 3 км на південний схід від м. Берегове (рис. 1). Тут були встановлені 2 горизонтальні кварцових деформографи завдовжки 28 м (азимут 37°) і 12 м (азимут 73°), розташовані у відокремленому від решти штольні відсіку завдовжки близько 150 м.

Від входу у штольню цей відсік відділявся трьома перегородками з дверима (термошлюзами), для мінімізації метеотемпературних впливів на результати вимірювань (Латынина і др., 1992). Відстань до денної поверхні у місці встановлення деформографів становила понад 15 м, що разом з обладнанням шлюзів забезпечило відносно добре нівелювання прямого впливу сезонних коливань температури повітря та земної поверхні на результати вимірювань деформацій масиву порід. Але за рахунок термопружних деформацій, генерованих приповерхневими (на глибинах 0,2–5 м) шарами консолідованих порід південного схилу гори Мужіївської, все ж таки рівень сезонних варіацій напружено-деформованого стану масиву порід у зоні розташування деформографів був значний (рис. 2). Тому раніше (див. Назаревич і др., 2007; Назаревич та Назаревич, 2008; Назаревич, 2010, 2011) на записах деформацій цього пункту нам вдалося виділити тільки виразний провісник Виноградівського землетрусу 1989 р. (рис. 2). Саме відсутність напрацьованих методичних підходів щодо врахування,

зокрема, сезонних метеотемпературних впливів на результати деформографічних досліджень у Закарпатті була перешкодою для виділення можливих малоамплітудних (з амплітудами менше таких впливів) деформографічних провісників місцевих землетрусів (див. Латынина і др., 1988, 1992; Назаревич, 2006, 2008, 2010, 2011а, 2011б, 2012, 2013).

Постановка завдання. Враховуючи все сказане вище, нами було поставлено завдання провести аналіз та врахування метеотемпературних впливів на дані деформографічних спостережень на прикладі даних пункту "Мужієво" ("Берегове-1"), зокрема, з метою спробувати виділити за рахунок вивчення та редукції таких впливів можливий деформаційний провісник Виноградівських землетрусів 1988 р. (рис. 1), з використанням підходів напрацьованих і задіяних раніше для аналізу різних геофізичних даних (Назаревич, 2006, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013). Зокрема, аналіз даних та виділення з використанням ряду таких підходів виразного деформаційного провісника відчутних Виноградівських землетрусів 6.05.1989 р. ($M=2,8/2,4$, $\Delta=23$ км) (рис. 1) представлено нами у (Назаревич і др., 2007; Назаревич та Назаревич, 2008; Назаревич, 2010, 2011) (рис. 2).

Результати. Отже, предметом нашого дослідження стали дані деформографічних спостережень (Латынина і др., 1992) на розташованому в одній з розвідувальних штоль на території Мужіївського золото-поліметалічного родовища (Берегівське горбогір'я у Закарпатті) пункті "Мужієво" ("Берегове-1") (Назаревич, 2011а, 2011б) за 1986–1990 рр. (рис. 1). У цей період у Виноградівській сейсмоактивній зоні відбулися відчутні місцеві землетруси – 4.12.1988 р. і 6.05.1989 р. (з афтершоком) (Костюк та ін., 1997) (рис. 1). Другий із цих землетрусів супроводжувався дуже виразною геоакустичною аномалією (Вербицький та Назаревич, 2005), що, власне, і спричинило нашу увагу до деформографічних даних за цей період, коли ці дані були опубліковані авторами досліджень у відкритому доступі (Латынина і др., 1992; Вербицький та Назаревич, 2005). У результаті проведеного аналізу нами було виділено і досліджено аномалію – провісник землетрусу 6.05.1989 р. (рис. 2) (Назаревич і др., 2007; Назаревич та Назаревич, 2008; Назаревич, 2010, 2011а, 2011б), подібну за характером та часово-амплітудними параметрами до відповідної геоакустичної аномалії (Вербицький та Назаревич, 2005). У той же час, стосовно попереднього відчутного ($M=3,3$), хоч і трішки дальшого ($\Delta=31$ км) землетрусу 4.12.1988 р. (Костюк та ін., 1997), такої аномалії відмічено не було (знову ж подібно, як і у геоакустичних даних).

І все ж, при уважнішому розгляді на графіку деформації (рис. 2) можна помітити певні збурення ходу сезонної деформації у другій половині 1988 р. Але вони могли бути пов'язані з особливістю сезонної метеотемпературної хвилі, тому без детального кореляційного аналізу деформографічних та температурних даних робити якісь висновки тут не було можливим.

Для проведення такого аналізу нами залучено дані про зміни температури повітря та поверхні ґрунту на розташованій близько до пункту спостережень (на відстані 3 км) метеостанції "Берегове" (рис. 1) за 1986–90 рр. (рис. 3, а).

З цих даних за результатами спектрального аналізу виділено сезонну температурну хвилю і проведено її кореляційний аналіз з деформографічними даними. Методики такого аналізу з використанням різних пакетів програм напрацьовувались нами раніше для аналізу геоакустичних, деформографічних та геотермічних даних і вже представлені у ряді публікацій (Вербицький та Назаревич, 2005; Назаревич і др., 2007; Назаревич та Назаревич, 2008; Назаревич, 2008, 2010, 2011а, 2011б; Назаревич та ін., 2015; Nazarevych et al., 2010) та ін. За

результатами цього аналізу (з урахуванням трендової та сезонної складових (див. нижче)) згенеровано модельну "стаціонарну" термопружну деформацію на пункті "Мужієво" (рис. 3, б). Далі шляхом порівняння з фактичними деформаціями порід (рис. 4) виділено малоамплітудну (порівняно з сезонними термопружними деформаціями і з провісником Виноградівських землетрусів 1989 р.) аномалію – провісник Виноградівського землетрусу 1988 р.,

представлену на рис. 4 (загальний вигляд) і рис. 5 (варіаційна складова). Ця варіаційна складова (рис. 5) є різницею між повним рядом деформацій (рис. 4) і модельною "стаціонарною" термопружною деформацією (рис. 3, б) з урахуванням зміни тренду з моменту землетрусу 1989 р. (синій сектор на рис. 4).

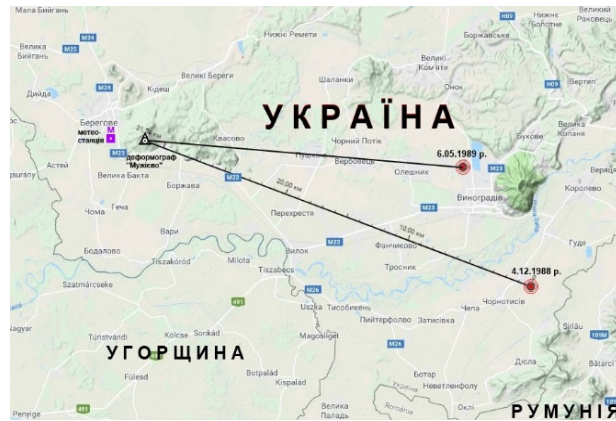


Рис. 1. Локалізація вогнищ відчутних місцевих Виноградівських землетрусів 1988–89 рр. відносно пункту "Мужієво" ("Берегове-1") на фрагменті карти центральної частини південної зони Закарпаття (картооснова Google з рельєфом, показана локалізація вогнищ землетрусів (•), пункту "Мужієво" (Δ) та відстані до вогнищ, а також локалізація метеостанції "Берегове" (mM))

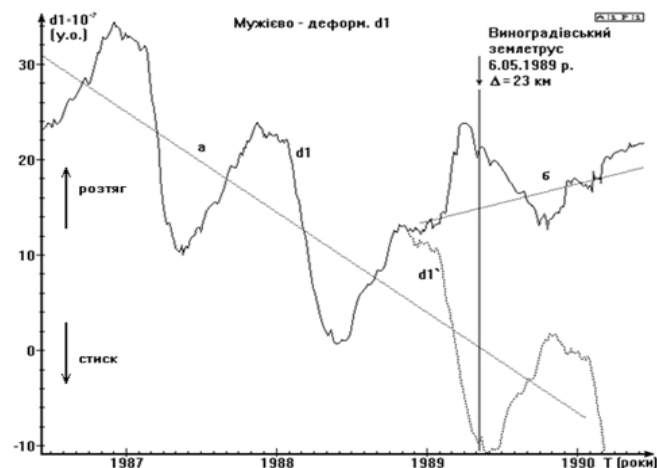


Рис. 2. Результати проведеного раніше (Назаревич и др., 2007; Назаревич та Назаревич, 2008; Назаревич, 2010, 2011а, 2011б) виділення і аналізу деформаційного провісника Виноградівських землетрусів 06.05.1989 р.

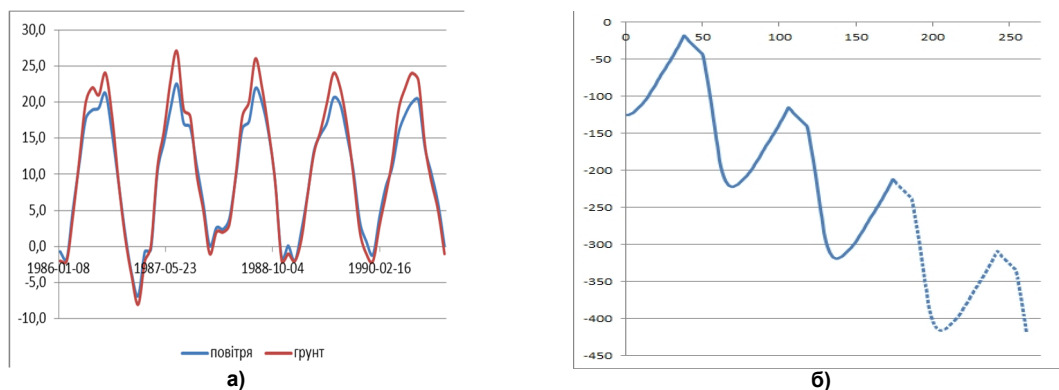


Рис. 3. Середньомісячні значення температури повітря та поверхні ґрунту на метеостанції "Берегове" за 1986–90 рр. (а) та модельна "стаціонарна" термопружна деформація на пункті "Мужієво" (з урахуванням трендової та сезонної складових) (б)

Аналіз результатів. Відзначимо, що величина виділеної аномалії є порівняно малою (див. рис. 4 і 5) – відносна деформація становить $\sim 3 \cdot 10^{-7}$. Порівняно з величиною сезонних метеотермопружних варіацій

($\sim 14 \cdot 10^{-7}$) аномалія є у 5 разів меншою і без детального дослідження і врахування сезонних метеотемпературних впливів виділити її не було можливим.

У той же час, порівняно з варіаціями деформацій відносно згенерованої (з урахуванням трендової та сезонної складових) модельної "стаціонарної" термопружної деформації за попередні 2 роки (липень 1986 р. – червень 1988 р.), величини яких не перевищують у середньому $0,5-0,7 \cdot 10^{-7}$ (рис. 4, 5), така аномалія є у 5–7 разів більшою, тобто виділяється досить надійно (рис. 5) – на рівні значно більше 3σ .

Тривалість аномалії перед землетрусом становила не менше 5 місяців – відхилення від "стаціонарного" ходу деформацій почалися у липні 1988 р., а сам землетрус відбувся 12 грудня 1988 р.

Аналізуючи коротко виділену аномалію порівняно з попередньо виділеною аномалією від землетрусів 1989 р. (рис. 4 і 5), відзначимо таке. Аномалія від землетрусу 1988 р. є у кілька разів менш вираженою. Це стосується як самої аномалії (відносна деформація $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ проти $\sim 13 \cdot 10^{-7}$), так і зміни трендової складової геомеханічного режиму земної кори (для аномалії – провісника землетрусу 1988 р.

зміна тренду помітно не простежується, а для аномалії – провісника землетрусів 1989 р. має місце зміна стиску величиною $\sim 11 \cdot 10^{-7}$ на рік і розтягм величиною $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ на рік). Правда, епіцентрально відстань для землетрусу 1988 р. ($\Delta=31$ км) є у півтора раза більша, ніж для землетрусів 1989 р. ($\Delta=23$ км). Але, з іншого боку, і магнітуда землетрусу 1988 р. ($M=3,3/K=9,9$) є помітно більшою, ніж для землетрусу 1989 р. ($M=2,8/K=9,1$), тобто за енергією ці землетруси різняться майже на порядок.

Така відмінність між розглянутими деформаційними провісниковими аномаліями, як уже зазначалося вище, кореспондується з відмінністю між відображеннями цих же землетрусів у геоакустичних даних – геоакустична аномалія – провісник землетрусів 1989 р., і є дуже виразною, вона виділена і детально проаналізована раніше (Вербицький та Назаревич, 2005; Назаревич, 2007; Назаревич і др., 2007) та ін., а геоакустична аномалія-провісник землетрусу 1988 р. виразно не простежується.

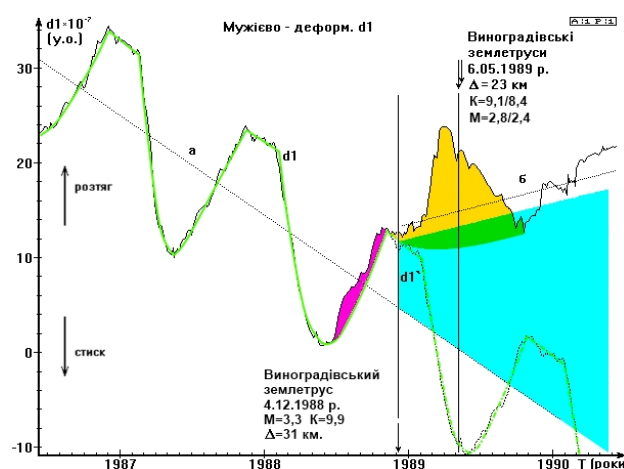


Рис. 4. Виділення (з урахуванням сезонних метеотермопружних деформацій) малоамплітудної деформаційної аномалії – провісника Виноградівського землетрусу 04.12.1988 р. (пояснення – у тексті). Показана також виділена нами раніше (Назаревич, 2007, 2008, 2010а, 2010б; Назаревич та Назаревич, 2008; Назаревич і др., 2007) аномалія – провісник Виноградівського землетрусу 06.05.1989 р.

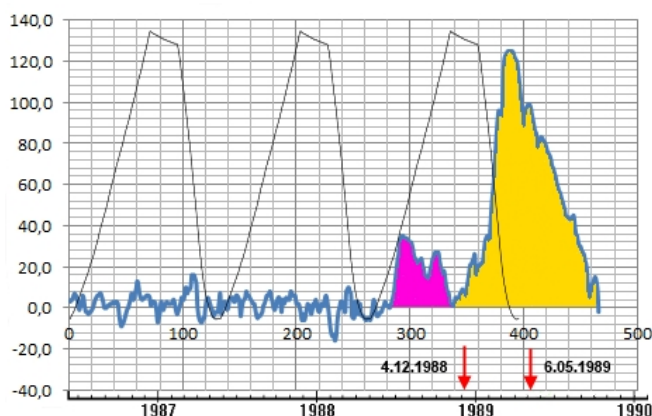


Рис. 5. Виділені деформаційні аномалії (варіаційні складові) – провісники Виноградівських землетрусів 04.12.1988 р. (відмічена рожевим) і 06.05.1989 р. (відмічена жовтим) на фоні сезонних хвиль деформацій (шкала деформацій в умовних одиницях, інші пояснення – у тексті)

Очевидно, відмінність між аномаліями – провісниками землетрусів 1988 і 1989 років спричинена, в основному, особливостями геомеханіки їх вогнищевих зон, відмінностями механізмів цих землетрусів і відмінностями будови земної кори на трасах "вогнище – пункт спостережень", зокрема ймовірним впливом наявного тут поперечного до простягання Закарпатського прогину і траси поширення деформацій до пункту спостережень від вогнища землетрусу 1988 р. Виноградівського

глибинного розлому та супутніх дрібніших розломів фундаменту (Назаревич та Назаревич, 2008). Всі ці питання вимагають подальшого детального і комплексного аналізу, у т. ч. й із залученням елементів математичного моделювання вказаних особливостей.

Щодо "провісникової" тривалості, то обидві аномалії подібні – вони почалися приблизно за 5 місяців до відповідних сейсмічних подій: перша – у липні 1988 р., а сам землетрус відбувся 12 грудня 1988 р.; друга – у грудні 1988 р., а сам землетрус відбувся 6 травня 1989 р. Але постсейсмічна

тривалість аномалії 1989 р. є значно більшою (також порядку 5 місяців після землетрусу (рис. 5)), у той час як аномалія 1988 р. закінчилась ще перед "своїм" землетрусом. Правда, тут можливо мало місце перекриття початком аномалії 1989 р. "хвоста" аномалії 1988 р., але об'єктивно встановити це не вдається можливим.

Висновки. Підсумовуючи викладене, можна стверджувати, що розроблена методика дослідження і врахування метеотемпературних впливів на геофізичні (зокрема, деформографічні) дані дає змогу ефективно враховувати (редувати на порядок і більше) метеотермопружні деформації і за рахунок цього виділяти з деформографічних даних малоамплітудні (на рівні у кілька разів менше амплітуд сезонних термopружних деформацій) деформаційні аномалії – провісники землетрусів. Можливості виділення таких аномалій фактично у кілька разів збільшують реальну чутливість і/або зону контролю конкретного пункту деформографічних спостережень, даючи змогу виявляти деформаційні провісникові аномалії на тих же, що й раніше, епіцентральных відстанях від значно слабших землетрусів і на значно більших відстанях від землетрусів такої ж, як раніше, магнітуди. Це значно підвищує ефективність (враховуючи згадані вище обмеження методичного і економічного характеру) та результативність деформографічних сейсмонісних та інженерно-геофізичних досліджень і моніторингу, саме у цьому полягає головне практичне значення представлених підходів та методик.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі – використання напрацьованих підходів і методик для детального дослідження деформографічних даних за останні роки по режимній геофізичній станції "Берегове" у Закарпатті (Назаревич, 2011, 2012, 2013; Назаревич і др., 2011, 2015; Назаревич та Микита, 2010; Мицик та ін., 2011; Nazarevych et al., 2010), з використанням результатів вже спеціального локального температурного моніторингу, зокрема, даних контрольного температурного каналу сучасної цифрової деформографічної апаратури (Назаревич, 2011; Назаревич і др., 2011, 2015; Мицик та ін., 2011), будуть висвітлені у наступних публікаціях.

Список використаних джерел

- Вербицький, Т., Гнип, А., Малицький, Д., Назаревич, А., Вербицький, Ю., Ігнатишин, В., Новотна, О., Нарівна, М., Ярема, І. (2003). Мікросейсмічні і деформаційні дослідження в Закарпатті: результати та перспективи. *Геофіз. журнал*, 23, 3, 99–112.
- Вербицький, Т., Ігнатишин, В., Латиніна, Л., Юркевич, О. (1998). Сучасні деформації земної кори Берегівської горстової зони. *Геодинаміка*, 1, 118–120.
- Вербицький, Т.З. Назаревич, А.В. (2005). Деформографічні і геоакустичні дослідження у Закарпатті. У кн.: Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. За ред. В.І. Старостенка. Київ: Наук. думка, 113–131.
- Костюк, О. Сагалова, Е., Руденська, І., Пронишин, Р., Кендзера, О. (1997). Каталог землетрусів Карпатського регіону за 1091–1990 роки. *Праці НТШ. Львів*, 1, 121–137.
- Латиніна, Л.А. Юркевич, О.І., Байсарович, І.М. (1992). Результати деформационных измерений в районе Берегово. *Геофиз. журнал*, 14, 2, 63–67.
- Латиніна, Л.А. Жаринов, Н.А., Крамер, М.В., Савин, И.В., Широков, И.А. (1988). Методические рекомендации по исследованию деформационных предвестников землетрясений. Москва: ИФЗ АН СССР.
- Мицик, Б.Г. Назаревич, А.В., Баштевич, М.В., Назаревич, Р.А. (2011). Безконтактні ємнісні вимірювачі мікропереміщень у деформографічних геофізичних дослідженнях. *Відбір і обробка інформації*, 35(111), 69–76.
- Назаревич, А. (2006). Деформографічні дослідження в районі м. Берегового на Закарпатті. *Праці НТШ. Львів. Геофізика*, XVII, 129–139.
- Назаревич, А. Назаревич, Л. (1999). Оптоелектронний вимірювальний канал до кварцевого деформографа. *Геодинаміка*, 1(2), 116–120.
- Назаревич, А.В. (2008). Деформаційні провісники відчутних Виноградівських землетрусів Закарпаття: аналіз деформаційних процесів та оцінка величин деформацій у вогнищі. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 45, 23–30.
- Назаревич, А.В. (2010). Геофізичні провісники деяких відчутних закарпатських землетрусів як відображення процесів формування вогнищевих зон. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 274–285.
- Назаревич, А.В. (2011а). Деформографічний метод у дослідженнях сейсмотектонічних процесів у вогнищевих зонах землетрусів Закарпаття. *Геодинаміка*, 1(10), 134–146.
- Назаревич, А.В. (2011б). Методико-апаратні проблеми моніторингових геофізичних досліджень та шляхи їх розв'язання (на прикладі геофізичного сейсмонісного моніторингу в Закарпатті). *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 55, 57–60.

Назаревич, А.В. (2012). Деформационные предвестники землетрясения Украинского Закарпатья, их связь с геомеханикой литосферы и оценка деформаций в очаговой зоне. *Проблемы сейсмологии в Узбекистане*, 9, 41–44.

Назаревич, А.В. (2013). Відображення локального, регіонального та глобального сейсмотектонічного процесу у деформаціях порід активних тектонічних структур і прогноз землетрусів. *Геодинаміка*, 2(15), 244–246.

Назаревич, А.В. Бокун, О.М., Назаревич, Л.Є. (2015). Структура, динаміка і сейсмотектоніка скидових зон (за результатами фізичного моделювання та польових досліджень). Частина 2: Польові дослідження. *Геодинаміка*, 2(19), 55–71.

Назаревич, А.В. Латынина, Л.А., Назаревич, Л.Е. (2007). Геоакустические и деформационные предвестники землетрясений Украинского Закарпатья. *Материалы докладов Международной геологической конференции "Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов"*. Казань, 13–16 ноября 2007 г., 1, 250–254.

Назаревич, А.В. Микита, А.Ю. (2010). Метеотемпературні поля в масивах порід (як фактор впливу на результати деформографічних спостережень на РГС "Берегове" у Закарпатті). *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 286–299.

Назаревич, А.В. Назаревич, Л.Є. (2008). Деформаційні провісники закарпатських землетрусів: методи виділення та результати аналізу. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 311–320.

Назаревич, А.В. Календа, П., Мыцык, Б.Г. (2011). Аппаратурное обеспечение и некоторые результаты деформографических и наклонотных наблюдений на РГС "Берегово" в Украинском Закарпатье. *Геодинаміка*, 2(11), 213–215.

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory LIGO. (2018). Retrieved from <https://www.advancedligo.mit.edu/>

Nazarevych, A., Nazarevych, L., Nasonkin, V., Boborykina, O. (2010). Extensometric researches in Ukraine: methods, instruments, results. *Geophys. Journal*, 32, 4, 121–123.

References

- Kostyuk, O., Sagalova, E., Rudenska, I., Pronyshyn, R., Kendzera, O. (1997). Catalogue of earthquakes in the Carpathian region for the period 1091-1990. *Proceedings of the SSS (Shevchenko Scientific Society)*. Lviv, 1, 121-137. [In Ukrainian]
- Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory LIGO. (2018). Retrieved from <https://www.advancedligo.mit.edu/>
- Latynina, L.A., Jurkevich, O.I., Bajsarovich, I.M. (1992). Results of deformation measurements in Beregovo area. *Geophys. journal*, 14, 2, 63-67. [In Russian]
- Latynina, L.A., Zharinov, N.A., Kramer, M.V., Savin, I.V., Shirokov, I.A. (1988). Methodical recommendations for studies of deformation precursors of earthquakes. Moscow: IFZ AS USSR. [In Russian]
- Mytsyk, B.G. Nazarevych, A.V., Bashtevych, M.V., Nazarevych, R.A. (2011). Microdisplacement noncontact capacitive measuring sensors in extensometers geophysical researches. *Sampling and processing of information*, 35(111), 69-76. [In Ukrainian]
- Nazarevych, A. (2006). Deformation studies in Beregovo area in Transcarpathians. *Proceedings of the SSS (Shevchenko Scientific Society)*. Lviv. *Geophysics*, XVII, 129-139. [In Ukrainian]
- Nazarevych, A.V. (1999). Optical-electronic measuring channel to the quartz deformograph. *Geodynamics*, 1(2), 116-120. [In Ukrainian]
- Nazarevych, A.V. (2008). Deformation precursors of tangible Vynogradiv earthquakes in Transcarpathians: analysis of deformation processes and estimation of deformation in the course. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 45, 23-30. [In Ukrainian]
- Nazarevych, A.V. (2010). Geophysical precursors of some perceptible transcarpathian earthquakes as an reflection of sources areas forming processes. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, 274-285. [In Ukrainian]
- Nazarevych, A.V. (2011). Extensometric method on study of seismotectonic processes in source areas of Transcarpathians earthquakes. *Geodynamics*, 1(10), 134-146. [In Ukrainian]
- Nazarevych, A.V. (2011). Methodological-apparatus problems of monitoring geophysical researches and ways of their solution (on an example of geophysical seismoprogностic monitoring in Transcarpathians). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 55, 57-60. [In Ukrainian]
- Nazarevych, A.V. (2012). Deformation precursors of earthquake in Ukrainian Transcarpathians, their relationship with geomechanics of lithosphere and evaluation of deformations in the focal zone. *Problems of seismology in Uzbekistan*, 9, 41-44. [In Russian]
- Nazarevych, A.V. (2013). Reflection of local, regional and global seismotectonic processes in deformations of rocks of active tectonic structures and earthquake prognosis. *Geodynamics*, 2(15), 244-246. [In Ukrainian]
- Nazarevych, A.V., Bokun, A.N., Nazarevych, L.Ye. (2015). Structure, dynamics and seismotectonics of faulting zones (by results of physical modelling and field studies). Part 2: Field studies. *Geodynamics*, 2(19), 55-71. [In Ukrainian]
- Nazarevych, A.V., Kalenda, P., Mycyk, B.G. (2011). Hardware and some results of extensometric and tiltmetric observations in RGS "Beregovo" in Ukrainian Transcarpathians. *Geodynamics*, 2(11), 213-215. [In Russian]
- Nazarevych, A.V., Latynina, L.A., Nazarevych, L.E. (2007). Geoacoustic and deformation precursors of earthquakes of Ukrainian Transcarpathians. *Proceedings of International Geological Conference "The Changing Geological Environment: Space-Time Interactions of Endogenous and Exogenous Processes"*. Kazan, November 13-16, 2007, 1, 250-254. [In Russian]
- Nazarevych, A.V., Mykyta, A.Yu. (2010). Meteoheothermal fields in the rocks massifs (as a factor of influence on the results of extensometric observations in RGS "Beregovo" in Transcarpathians). *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, 286-299. [In Ukrainian]

Nazarevych, A.V., Nazarevych, L.Ye. (2008). Deformation precursors of Transcarpathian earthquakes: extracting methods and analysis results. *Theoretical and applied problems of geoinformatics*, 311-320. [In Ukrainian]
 Nazarevych, A., Nazarevych, L., Nasonkin, V., Boborykina, O. (2010). Extensometric researches in Ukraine: methods, instruments, results. *Geophys. journal*, 32, 4, 121-123.
 Verbytskyi, T., Gnyr, A., Malitskiy, D., Nazarevych, A., Verbytskyi, Y., Ignatyshyn, V., Novotna, O., Narivna, M., Yarema, I. (2003). Microseismic

and deformation studies in Transcarpathians: results and outlooks. *Geophys. Journal*, 25, 3, 99-112. [In Ukrainian]

Verbytskyi, T., Ihnatyshyn, V., Latynina, L., Yurkevych, O. (1998). Recent deformation in the Earth's crust of Beregov horst zone. *Geodynamics*, 1, 118-120. [In Ukrainian]

Verbytskyi, T.Z., Nazarevych, A.V. (2005). Deformation and geoaoustic studies in Transcarpathians. In: "Studies of modern geodynamics of Ukrainian Carpathians". Ed. V.I. Starostenko. Kyiv: Naukova dumka, 113-131. [In Ukrainian]

Надійшла до редколегії 06.03.18

A. Nazarevych, Cand. Sci (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Senior Researcher,
 ORCID-0000-0002-1989-0790,
 E-mail: nazarevych.a@gmail.com
 Carpathian Branch of Subbotin name Institute of Geophysics of NAS of Ukraine,
 3b Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine
 L. Nazarevych, Cand. Sci (Geol.), Researcher,
 ORCID-0000-0001-8038-9535,
 E-mail: nazarevych.L@gmail
 Subbotin name Institute of Geophysics of NAS of Ukraine,
 Department of Seismicity of the Carpathian Region,
 27 Yaroslavenko Str., Lviv, 79012, Ukraine
 N. Bashtevych, Leading programmer,
 E-mail: nbash@ukr.net
 Lviv Hydrometeorology Centre.
 58A Chuprynki Str., Lviv, 79044, Ukraine

SELECTION OF SMALL-AMPLITUDE DEFORMATION ANOMALIES – PRECURSOR OF LOCAL TRANSCARPATHIAN EARTHQUAKES WITH TAKING INTO ACCOUNT THE METEOTHERMOELASTIC DEFORMATIONS

The purpose of the article is to present a methodology of studies and reduction of meteorothermoelastic deformations from extensometers data and the results of selection with its application of small amplitude deformation anomalies – precursors of local Transcarpathian earthquakes.

The studies of meteorothermal influences on the data of geophysical observations regime and the development of ways to taking into account such influences is one of the important tasks in conducting of geodynamic monitoring. This is especially relevant for extensometers studies.

The research methodology consist of conducting a correlation analysis of extensometer and meteorothermoelastic data and reduction of selected seasonal meteorothermoelastic strains from variational deformations time series. As a result of those researches, in particular, the correlation between the temperature of air and deformations of the rocks massif at the "Muzhievo" observation point (Ukrainian Transcarpathians) was studied. The reduction of selected seasonal meteorothermoelastic strains was carried out and a low amplitude deformation anomaly – the precursor of the local Transcarpathian earthquake with a magnitude $M=3.3$ at an epicenter distance of 31 km is identified.

Selected anomaly has an amplitude (in relative deformations) $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ (in comparison with the value of the seasonal meteorothermoelastic variations $\sim 14 \cdot 10^{-7}$), it is 5-7 times greater than the amplitude of difference fluctuations ($0.5-0.7 \cdot 10^{-7}$) between the registered variations of deformations and the "regular" seasonal meteorothermoelastic wave. The "precursor" duration of the anomaly is about 5 months.

The practical significance of the work consists, in particular, in the fact that the application of the developed technique provides reduction of meteorothermal influences and allows the search of low-amplitude deformation anomalies – precursors of earthquakes against the background of thermoelastic deformations. This, in fact, many times increases the actual sensitivity and, respectively, the zone of geodynamic and seismoprognostic control of concrete point of extensometers observations.

Keywords: seismoprognostic studies, deformation of rocks, meteorothermal influence, thermoelastic strain, anomaly – precursor of earthquake, Ukrainian Transcarpathians.

А. Назаревич, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
 ORCID-0000-0002-1989-0790,
 E-mail: nazarevych.a@gmail.com
 Карпатское отделение Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
 ул. Научная, 3-б, г. Львов, 79060, Украина
 Л. Назаревич, канд. геол. наук, науч. сотр.,
 ORCID-0000-0001-8038-9535,
 E-mail: nazarevych.L@gmail.com
 Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
 Отдел сейсмичности Карпатского региона,
 ул. Ярославенко, 27, г. Львов, 79012, Украина
 Н. Баштевич, вед. программист,
 E-mail: nbash@ukr.net
 Львовский региональный центр по гидрометеорологии,
 ул. Чупрынки, 58А, г. Львов, 79044, Украина

ВЫДЕЛЕНИЕ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ – ПРЕДВЕСТНИКОВ МЕСТНЫХ ЗАКАРПАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С УЧЕТОМ МЕТЕОТЕРМОУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Целью статьи является представление методики исследования и редукции метеотермоупругих деформаций на основе деформографических данных и результатов выделения, с ее применением, малоамплитудных деформационных аномалий – предвестников местных закарпатских землетрясений.

Изучение метеотемпературных воздействий на данные режимных геофизических наблюдений и разработка способов учета таких воздействий является одной из важных задач при проведении геодинамического мониторинга. Особенно актуальным это является для деформографических исследований.

Методика исследований заключалась в проведении корреляционного анализа деформографических и метеотемпературных данных и редукции выявленных сезонных метеотермоупругих деформаций из вариационных деформографических рядов. В результате таких исследований изучена корреляция между температурой воздуха и деформациями массива пород на пункте наблюдений "Мужиево" (Украинское Закарпатье) и путем редукции выявленных сезонных метеотермоупругих деформаций выделена малоамплитудная деформационная аномалия – предвестник местного Закарпатского землетрясения с магнитудой $M=3.3$ на эпицентральной расстоянии 31 км.

Выделенная аномалия имеет амплитуду (в относительных деформациях) $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ (по сравнению с величиной сезонных метеотермоупругих вариаций $\sim 14 \cdot 10^{-7}$), она в 5-7 раз больше амплитуды разностных флуктуаций ($0.5-0.7 \cdot 10^{-7}$) между зарегистрированными вариациями деформаций и "стационарной" сезонной метеотермоупругой волной, "предвестниковая" продолжительность аномалии составляет около 5 месяцев.

Практическая значимость работы заключается, в частности, в том, что применение разработанной методики обеспечивает редукцию метеотемпературных воздействий на порядок и более и дает возможность поисков малоамплитудных деформационных аномалий – предвестников землетрясений на фоне термоупругих деформаций, что фактически во много раз увеличивает реальную чувствительность и, соответственно, зону геодинамического и сейсмопрогностического контроля конкретного пункта деформографических наблюдений.

Ключевые слова: сейсмопрогностические исследования, деформации пород, метеотемпературное влияние, термоупругая деформация, аномалия – предвестник землетрясения, Украинское Закарпатье.

УДК 550.382.3

О. Меньшов, д-р геол. наук, старш. наук. співроб.,

E-mail: menshov.o@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна

ІНФОРМАТИВНІСТЬ МАГНІТНИХ МЕТОДІВ ПРИ МОНІТОРИНГУ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ, ЯКІ ПОВ'ЯЗАНІ З ОБ'ЄКТАМИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Наведено результати науково-дослідних робіт із залученням геоінформаційних та геофізичних методів для розв'язання завдань із моніторингу небезпечних природних та техногенних процесів на території розташування об'єктів критичної інфраструктури. Було виокремлено ряд потенційно можливих напрямів використання магнітних методів з метою моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, а також пов'язаних із ними природних і техногенних процесів. Це об'єкти, які можуть впливати на зміни ґрунтового покриву, склад атмосферного повітря, а також приповерхневих геологічних горизонтів. Серед них підприємства енергетичної, хімічної промисловості, а також транспортна мережа і зсувонебезпечні ділянки. Як тестовий полігон обрано ділянку "Ржищів" та пункт "Гребені" – як об'єкти зсувонебезпечної критичної інфраструктури. За результатами обробки космоснімок та вимірювання латеральних та вертикальних розподілів магнітної сприйнятливості ґрунтів і приповерхневих геологічних горизонтів проведено класифікацію ризиків дослідженої території. Найбільш потенційно небезпечною визначено територію обриву на схилі Дніпра. Антропогенно навантажена природно-техногенна територія польової дороги та приватного господарства отримала середню категорію ризиків. Найбільш ризикові ділянками є елементи ландшафту, які знаходяться у межах земель із мінімальним ухилом, відсутністю антропогенного навантаження – сільськогосподарське угіддя та цілина. Магнітні методи виявилися експресними, ефективними та низькоартістичними при дослідженні природних та природно-техногенних процесів, пов'язаних із об'єктами критичної інфраструктури за умови комплексування із іншими геофізичними, ґрунтознавчими методиками та ГІС-технологіями.

Ключові слова: критична інфраструктура, природні та техногенні процеси, ґрунти, магнетизм навколишнього середовища, магнітна сприйнятливість.

Вступ. Об'єкти критичної інфраструктури на етапі сучасного розвитку людства відіграють визначальну роль у забезпеченні суспільства енергетичними та продовольчими ресурсами, дозволяють гарантувати безпеку життя, є основою принципів сталого розвитку та існування. Надійність, продуктивність, безперервна робота, безпека, вчасне технічне обслуговування є складовими захисту об'єктів критичної інфраструктури (Alcaraz and Zeadally, 2015). Набір превентивних заходів щодо охорони критичної інфраструктури країн світу вважається національним пріоритетом, а реалізуються вони на основі моніторингу природних та техногенних процесів навколишнього природного середовища (Macaulay, 2016).

На сьогодні відома значна кількість методологічних підходів для оцінки ризиків критичної інфраструктури (Giannopoulos et al., 2013). Використовується набір методів і технологій з метою ідентифікації та класифікації загроз, виявлення вразливості конкретних об'єктів, оцінки впливу небезпечних процесів. Звичайно, вибір методологічного підходу ґрунтується на обсязі запланованих робіт, інституційній належності замовників (національний або локальний рівень), а отже і наборі завдань, які мають бути розв'язаними.

Колективом ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка проводяться науково-дослідні роботи із залученням геоінформаційних та геофізичних методів до розв'язання конкретних завдань із моніторингу небезпечних природних та техногенних процесів на території розташування об'єктів критичної інфраструктури. Результатом цих робіт став звіт за перший етап досліджень у рамках НДР (Вижва та ін., 2018), де розглянуто низку відповідних об'єктів та методів для їх моніторингу. У даній статті пропонується більш детально проаналізувати інформативність геофізичної складової моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. Зокрема, акцент робиться на потенціалі експресних та дешевих магнітних методів вивчення навколишнього природного середовища (Thompson, 2012).

При постановці завдання дослідження інформативності магнітних методів з метою моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, а також пов'язаних із ними природних і техногенних процесів, нами було виокремлено ряд потенційно можливих напрямів дослідження.

У першу чергу йдеться про об'єкти, які можуть впливати на зміни ґрунтового покриву, склад атмосферного повітря, а також приповерхневих геологічних горизонтів. Серед згаданих об'єктів є підприємства енергетичної, хімічної промисловості, а також транспортна мережа. Зазначена інфраструктура впливає на зміни навколишнього природного середовища. Законодавство України відносить до "критично важливих об'єктів інфраструктури" такі, діяльність яких пов'язана із технологічними процесами та які можуть порушувати функціонування екосистеми, чинити негативний вплив на стан навколишнього природного середовища, загрозувати загрозу життю і здоров'ю людей. Крім того, Європейський Союз визначає критичну інфраструктуру як систему, важливу для підтримки життєво важливих соціальних функцій. У даному контексті слід розглядати поняття екосистемного сервісу (ecosystem service) (Hauck et al., 2013). Екосистемний сервіс розподіляється на чотири класи (Helming et al., 2013): сировинний, регуляторний, допоміжний та гуманітарний. Нас цікавить третій клас – допоміжний сервіс, який досліджує природні та урболандшафти, ґрунтові покриви та ґрунтоутворювальні процеси, їх зміни, фотосинтез та кругообіг поживних речовин, процеси ерозії та деструкції, забруднення та техногенної деградації у межах території локації об'єктів критичної інфраструктури. Більш детально місце магнітних методів у екосистемному сервісі та можливі зв'язки з об'єктами критичної інфраструктури розглядається у публікації (Меньшов та Харіна, 2016).

Стан проблеми застосування магнітних методів при дослідженні об'єктів і процесів, що пов'язані з критичною інфраструктурою. В основу теоретичних передумов застосування магнітних методів для оцінки впливу природних і техногенних процесів на об'єкти критичної інфраструктури покладається існування тісних кореляційних зв'язків між даними процесами та магнітними властивостями ґрунтів, а також деяких підстильних порід верхньої частини геологічного розрізу. Ці взаємозв'язки підтверджуються побудовою відповідних моделей (Menshov and Sukhorada, 2017), розробкою фізичних та хімічних основ застосування магнетизму ґрунтового покриву (Gadirov et al., 2018; Menshov et al., 2018).

Розглянемо сучасний стан проблеми дослідження умовно незабруднених ґрунтів для випадку природних

процесів. До цієї частини віднесемо роботи, присвячені аналізу стану ґрунтів, їх ерозії та змиву, впливу пожеж, деградації, деструкції, водних режимів, ущільненню, визначенню фізико-хімічних параметрів. Усі зазначені природні процеси є складовими формування зсувів. При цьому важливим є розуміння фізичної сутності методу, алгоритму утворення взаємозв'язків, магнітної мінералогії ґрунтів (Menshov, 2018). У роботі (Водяницький, 2010) розглядаються мінерали заліза у ґрунтах як основні носії їх магнетизму. Відзначається провідна роль магнетиту, магеміту, гематиту, гетиту, піриту і піротину у системі утворення та діагенетичних змін у процесі розвитку ґрунтового профілю, а також ключова роль оксидів заліза та їх трансформації у процесі педогенезу (розвитку ґрунтового профілю) – як умова формування сучасної магнітної картини різних типів ґрунтів (Schwertmann, 1985). При цьому значущу роль при ідентифікації походження феромагнетиків у ґрунтах відіграє їх розмір та доменний стан. Вплив глинистих мінералів на формування магнетизму ґрунтів розглядається у роботі (Lourenço et al., 2012). Крім того, розглянуто взаємозв'язки між магнітними властивостями сучасних та викопних ґрунтів (у ряді випадків маркерів зсувної активності), вплив кліматичних та інших умов на їх формування (Maher, 1998). На основі магнітних параметрів проводиться ідентифікація та розділення різних типів ґрунтів, наприклад за показником процесу оглеювання.

У рамках даної статті розглядаються об'єкти критичної інфраструктури, розміщені в межах територій, домінуючим ґрунтовим покривом яких є різні типи чорноземів. Вивченню магнітності цих продуктивних земель присвячена робота (Jeleńska et al., 2008). Одним із важливих питань при моніторингу об'єктів критичної інфраструктури є вплив пожеж на продуктивність та загальний стан ґрунтів. Під впливом пожежі зазнає суттєвої зміни магнітна будова ґрунтів. Тобто метод успішно застосовується для виявлення таких ділянок після проходження певного часу та формування рослинного покриву (Blake et al, 2006).

У контексті визначення зсувної небезпеки важливу роль відіграють ерозійні процеси ґрунтів. Власне водну ерозію ґрунтового покриву, що спостерігається найбільш гостро у межах схилів, можна вважати частиною зсувних процесів верхньої частини геологічного розрізу. Під час ерозійних процесів відслонюються глибші ґрунтові генетичні горизонти, які можна ідентифікувати при вимірюванні набору магнітних параметрів, насамперед найбільш експресного та дешевого для визначення параметра магнітної сприйнятливості. Ерозійні процеси значно прискорюють деградацію продуктивних земель (Giovannini et al., 1988), що, у свою чергу, проявляється у зниженні ефективної потужності верхніх гумусових горизонтів, вологості ґрунтів, здатності акумулювати та утримувати необхідні поживні речовини навіть за умови їх штучного внесення, негативно позначається на фізико-хімічних властивостях верхнього шару ґрунтів. У той же час відзначається, що за допомогою зонування еродованих ділянок на основі вимірювання магнітної сприйнятливості можна робити прогностичні висновки про розвиток ерозії, що виникає у процесі обробітку земель (Jordanova et al., 2011). Для виявлення ерозії ґрунтів слід вивчати вертикальні розподіли магнітних параметрів у ґрунтах з метою ідентифікації процесів змиву на поверхні (Kapicka et al., 2013). Крім того, магнітний метод успішно застосовується для ефективного та експресного визначення ерозії ґрунтів без залучення фізико-хімічних вартісних досліджень. Також магнітні методи застосовуються для моніторингу перерозподілу ґрунтів.

Ведучи мову про техногенні процеси, пов'язані з об'єктами критичної інфраструктури, магнітні методи продемонстрували високу інформативність при ідентифікації забруднення техногенно навантажених територій, міських агломерацій, урбанізованого середовища та інших місць розташування об'єктів критичної інфраструктури. Будуються схеми забруднень міст промисловими підприємствами із врахуванням ландшафтних умов територій досліджень. Найсуттєвіших результатів у своїх дослідженнях у світовому масштабі досягли європейські, китайські та американські наукові групи. Так, у роботі (Baco et al., 2010) представлені зміни магнітних властивостей ґрунтів та відкладів на поверхні бетонних конструкцій на прикладі Малайзії. Важливим питанням забруднення атмосфери є побудова баз даних магнетизму ґрунтів урбанізованих територій, чому присвячене дослідження у межах Великої Британії (Blundell et al., 2009). Відповідна інформація має використовуватися для оцінки техногенного навантаження різного генезису. Наприклад, у роботі (Bučko et al., 2010) проводиться ідентифікація забруднення придорожніх ґрунтів за рахунок автомобільного трафіку. Зауважимо, що одним із важливих об'єктів критичної інфраструктури за визначенням є автомобільні шляхи та залізниця. Отримані результати порівнюються і узагальнюються, що може в майбутньому стати основою для побудови інтерактивної магнітної карти забруднення довкілля (Wawer et al., 2015). Зауважимо, що найнебезпечнішими пиловими частинками, що пов'язані з технологічними процесами промислових об'єктів критичної інфраструктури, є так званий матеріал розміром у 10, 2.5, 1 мкм (PM10, PM2.5, PM1), що з легкістю проникає в організм людини під час дихання, завдаючи йому величезної шкоди. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВОЗ) (доповідь за травень 2016 року): "Забруднення атмосферного повітря за рахунок концентрацій малих і дрібних твердих частинок є найбільшим екологічним ризиком для здоров'я людей і призводить до більше ніж 3 млн передчасних смертей щорічно у всьому світі". Зазначене забруднення продукується здебільшого технологічними процесами, які покладені в основу функціонування критичної інфраструктури урбанізованого середовища. При цьому пилові фракції акумулюються в атмосфері, осідають у ґрунтового покриві, на гладких скляних поверхнях, корі та листі дерев і т. ін. Концентрація експресно та ефективно визначається магнітними методами.

Приклади. У межах дослідної ділянки "Ржищів" магнітні дослідження проводилися з метою виявлення взаємозв'язків між зонами зсувної небезпеки та станом ґрунтового покриву, переміщенням його шарів, ознаками ерозії, ущільнення. Дослідна ділянка належить до Лісо-степової зони. Нами було використано загальний опис ґрунтового покриву даної території, який наведено у таблиці 1 згідно з (Гузій та Тяміна, 2002). Ґрунтовий покрив – чорнозем типовий, підстильна порода – карбонатний лес, пилуватий, середньосуглинковий.

Всі згадані особливості чорноземів типових є умовою їх високої родючості, що зумовлює необхідність застосування сучасних технологій їх моніторингу для збереження цих ґрунтів, а також вивчення впливів на них об'єктів критичної інфраструктури.

Розглянемо узагальнений ґрунтовий магнітний розріз (рис. 1), який був вивчений нами на схилах Дніпра у межах залісненої території поблизу с. Ржищів. Спостерігалися тіла відриву, які фактично були, з одного боку, зсувними об'єктами, а з іншого – позірним переміщенням ґрунтових генетичних горизонтів, які надавали змогу провести ґрунтознавче та магнітне їх опробування.

Таблиця 1

Узагальнений морфологічний опис ґрунтів, характерних для ділянки "Ржиців"

Показник	Опис
Прив'язка	Дослідний стаціонар Інституту землеробства, 20 м на північ від польової дороги, 450 м на захід від с. Халеп'є
Рельєф	Високий опуклий горб, верхівка опуклого схилу східної експозиції 3–4°, поблизу горизонтального захисного вала
Мікрорельєф	Рівна частина схилу на 10 м нижче вала (непорушений ґрунт)
Угіддя	Рілля
Рослинність	Однolitні трави (віка, овес у задов. стані)
Стан поверхні	Ущільнена
Рівень ПГВ	>20 м
Ґрунтоутворювальна порода	Карбонатний лес, пилуватий, середньосуглинковий
Назва ґрунту	Чорнозем типовий середньозмитий, пилувато-середньосуглинковий на лесі

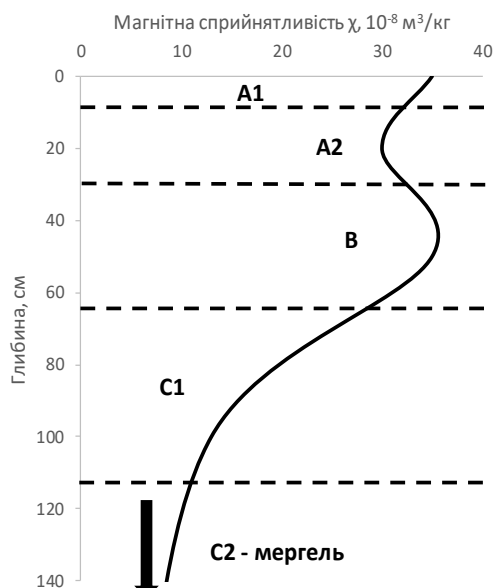


Рис. 1. Розподіл питомої магнітної сприйнятливості із глибиною у генетичних горизонтах ґрунтів та мергелів для зведеного розрізу ділянки "Ржиців"

У межах розрізу виділяються чотири основні ґрунтові генетичні горизонти A1, A2, B, C1. Крім того, у розріз включений глибше залягаючий горизонт мергелів C2. Горизонт A1 представлений гумусовим дернинним шаром чорнозему. Питома магнітна сприйнятливості досягає значень $\chi=35\text{--}40 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. На глибині 5–30 см зафіксований власне верхній гумусовий горизонт A1 із $\chi=30\text{--}32 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Перехідний горизонт B знаходиться на глибині 30–65 см і представлений лесами з ознаками вмісту гумусної речовини. У той же час його магнітність зів'язана із верхнім гумусовим горизонтом і становить $\chi=34\text{--}39 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Глибше за 70 см фіксується ґрунотвірний горизонт C1, що формується переважно лесовими породами, магнітна сприйнятливості суттєво спадає і сягає $\chi=10\text{--}15 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Також нами був опробований залягаючий набагато глибше, орієнтовно на позначці близько 300 см, горизонт мергелів. Його питома магнітна сприйнятливості складала $\chi=4\text{--}8 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Першочерговим завданням магнітних досліджень була ідентифікація ерозійних процесів ґрунтів, як одного із найбільш критичних факторів, що веде до втрати продуктивних земель. Одночасно перед нами постало завдання виявлення взаємозв'язків між ерозійними процесами ґрунтів та зсувною небезпекою. Для ідентифікації зсувних процесів важливою є інформація про змивання та перерозподіл ґрунтових генетичних горизонтів під впливом зсувів. Ідеться про відхилення від нормального залягання генетичних горизонтів. Зміна генетичних горизонтів відбувається у зміні величин маг-

нітної сприйнятливості. Наприклад, розглядаючи конкретну точку, навіть за умови її дернування, при вимірюванні магнітної сприйнятливості можна ідентифікувати той чи інший генетичний горизонт. Отже, якщо на поверхні фіксується замість горизонту A, горизонти B або C, тоді, скоріше за все, відбувся перерозподіл магнітного матеріалу. І навпаки, при фіксації у розрізі на певній глибині замість менш магнітних підстильних порід – похованих або сучасних ґрунтів, можна припускати, що відбувся перерозподіл магнітної речовини, а отже, мають місце ерозійні та зсувні процеси.

Для підтвердження зазначеного вище, важливим є дослідження латеральних змін магнітних параметрів, насамперед уздовж ландшафтних перетинів. З цією метою нами було проведено дослід поблизу с. Гребені, який включав дослідження питомої магнітної сприйнятливості для різних елементів ландшафту (рис. 2). Даний пункт спостереження також належить до ділянки "Ржиців". Перша секція перетину лежить у межах сільськогосподарського поля, засадженого кукурудзою. Ґрунтовий покрив – чорнозем типовий. Питома магнітна сприйнятливості $\chi=32\text{--}36 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Зауважимо, що відповідні значення були характерними і для верхнього гумусового горизонту, який розглядався на рис. 1. При закінченні насаджень кукурудзи на нерозораній ділянці сільськогосподарського угіддя магнітна сприйнятливості дещо зростає і становить $\chi=38\text{--}42 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Далі ландшафтний перетин переходить до секції травостою, яка протягом тривалого часу не зазнавала впливу агрономічного обробітку та оранки. Магнітна сприйнятливості продовжує демонструвати своє зростання, $\chi=40\text{--}43 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Максимальні значення магнітної сприйнятливості було зафіксовано у межах антропогенно зміненої секції, яка представлена польовою дорогою та домогосподарством, $\chi=50\text{--}55 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Далі розпочинається крутий схил, який веде до обриву біля р. Дніпро. Змінюється рослинність, з'являються ознаки заліснення, ґрунтовий покрив набуває характеристик сірого лісового. Із зростанням крутизни схилу відбувається поступове спадання величини магнітної сприйнятливості від $\chi=30\text{--}35 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ до $\chi=25\text{--}28 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ на заключних метрах перетину. Поблизу Дніпра поверхневі шари представлені лесовими утвореннями та привнесеними у процесі зсувної діяльності мергелями із значеннями $\chi=5\text{--}15 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Наведена картина розподілу питомої магнітної сприйнятливості вздовж ландшафтного перетину засвідчує відбиття у магнітній картині елементів агроландшафту та фіксує наближення до зсувонебезпечних ділянок поруч із Дніпром.

З метою розбраковки елементів ландшафту, їх типізації та категоризації за рівнем ризиків ми створили ГІС-проект, який включав обробку космознімки (ESRI ArcGIS Imagery) дослідної території та класифікацію полігонних об'єктів із врахуванням ландшафтних особливостей, зсувної небезпеки та магнітної сприйнятливості. На

рис. 3,а наводиться власне згаданий космоснімок тестової території, на рис. 3,б – його обробка із більш контрастним виділенням елементів ландшафту, на рис. 3,в представлені полігонні області за запропонованою нами схемою класифікації за магнітною сприйнятливостю, на

рис. 3,г, для більш зручної візуалізації, представлено накладання ландшафту на класифіковані нами полігонні області (дослідження виконане за допомогою ліцензованого продукту ESRI ArcGIS 10.3).

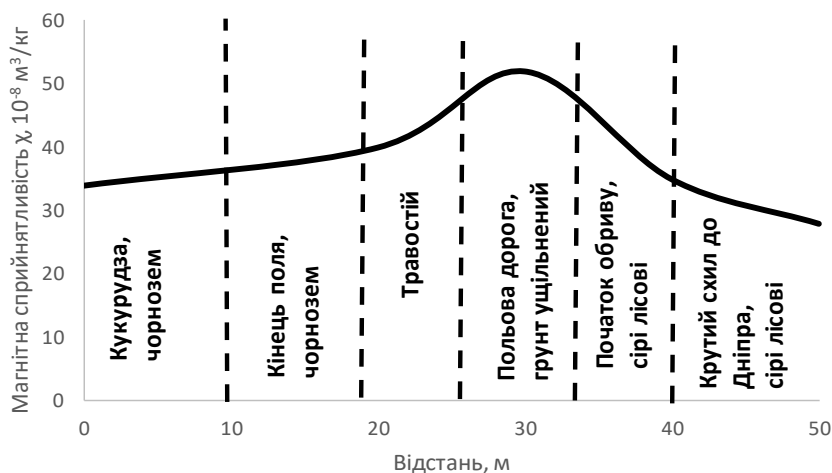


Рис. 2. Розподіл питомої магнітної сприйнятливості ґрунтів уздовж ландшафтного перетину ділянки "Ржищів", пункт "Гребені"

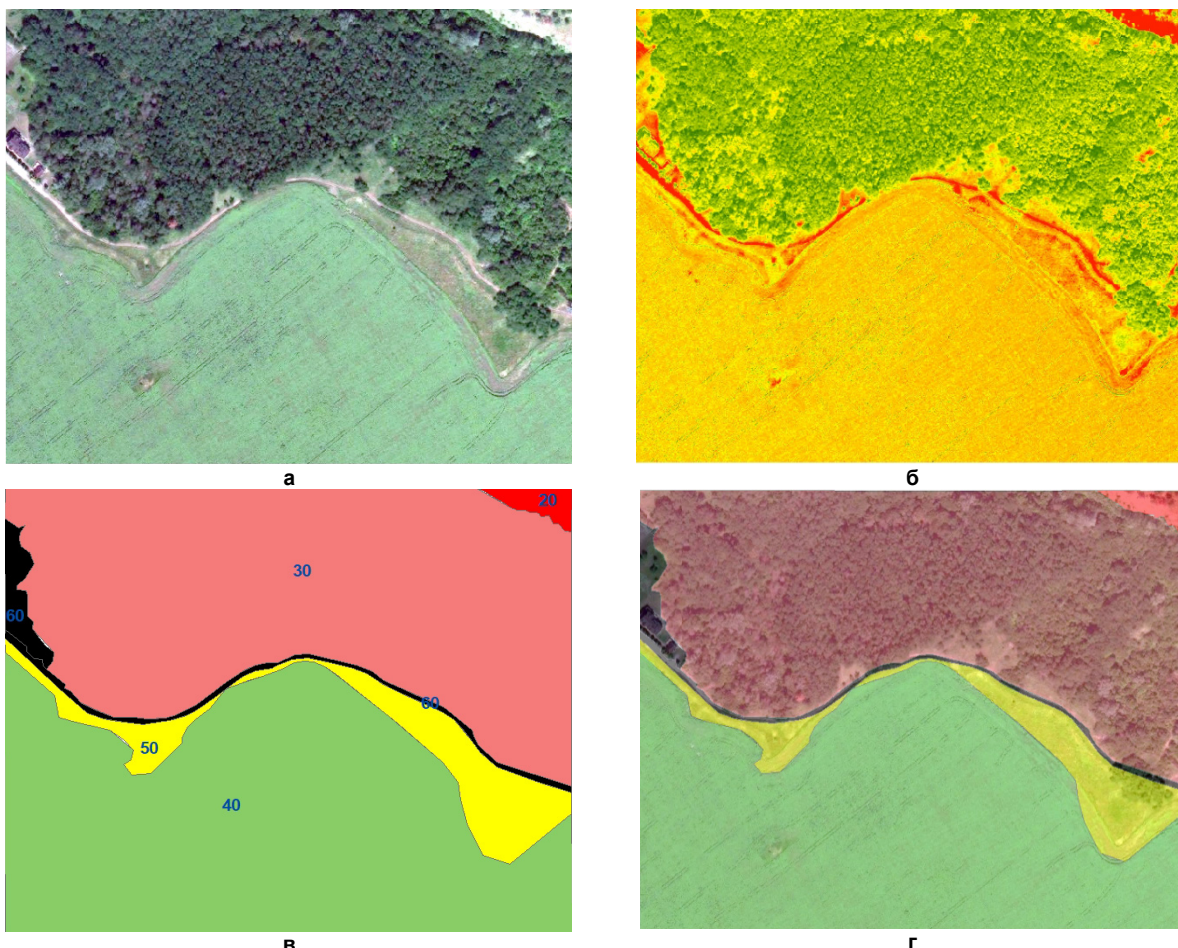


Рис. 3. Геопросторова модель дослідного пункту "Гребені":

а – космоснімок ландшафту за ESRI; б – фільтрація космоснімку ландшафту;

в – класифіковані полігони за величиною магнітної сприйнятливості ґрунтового покриття;

г – візуалізація накладання полігонних областей магнітної сприйнятливості ґрунтів на вихідний космоснімок ландшафту

Згідно з рис. 3 та описовими даними, які наводяться у табл. 2, у межах дослідної експериментальної ділянки нами виділення 6 елементів ландшафту. Кожному із полігонів надане осереднене характерне значення магнітної

сприйнятливості. Далі полігони класифіковано за трьома класам ризиків, пов'язаними з ознаками критичної інфраструктури або природними і техногенними процесами, які належать до неї. Категорія ризику 1 надана природним

елементам ландшафту, які знаходяться у межах земель із мінімальним ухилом та відсутністю антропогенного навантаження. Магнітна сприйнятливості є характерною для верхнього гумусового горизонту чорнозему. У межах ці-

линного полігону (50) значення дещо вище, ніж для полігону аграрного обробітку (40). Тобто зазначені елементи ландшафту характеризуються мінімальними ризиками розвитку небезпечних геологічних процесів.

Таблиця 2

Геопросторова класифікація елементів ландшафту дослідного пункту "Гребені" із врахуванням даних про магнітні властивості ґрунтового покриву

№ п/п	Елемент ландшафту	Колір	Осереднена магнітна сприйнятливості, 10^{-8} м ³ /кг	Категорія ризику
1	Сільськогосподарське угіддя	Зелений	40	1
2	Травостій, цілина	Жовтий	50	1
3	Польова дорога з ознаками антропогенного впливу	Чорний	60	2
4	Приватна територія з ознаками антропогенного впливу	Чорний	60	2
5	Ліс, обрив на схилі Дніпра	Рожевий	30	3
6	Берегова лінія	Червоний	20	3

Категорія 2 ризику надана полігонним областям умовно техногенного впливу. Це польова дорога (60) та приватне господарство (60). Ґрунтовий покрив цих полігонів має ознаки забруднення, що відбивається у підвищених значеннях магнітної сприйнятливості порівняно з фоновим чорноземом. У той же час за цих умов це антропогенне забруднення не є критичним, тому зазначеним елементам ландшафту надана категорія ризику 2.

Найвища категорія ризику 3 надана ділянкам із найбільшою зсувною небезпекою. Залісна територія обриву на схилі Дніпра (30) та зона поруч із береговою лінією із найбільшою небезпекою обвалів (20). Верхній геологічний горизонт складений відповідно менш магнітними сіримі-лісовими ґрунтами та лесеми з домішками мергелів.

Наведений приклад є ілюстративним і призначений для демонстрації можливостей магнітних методів при дослідженні об'єктів критичної інфраструктури та пов'язаних із ними природних і природно-техногенних процесів. Магнітні методи можуть розглядатися ефективними при комплексуванні з іншими геофізичними, геоінформаційними, геологічними та ґрунтознавчими вишукуваннями. Перевагою магнітних методів є простота їх реалізації, дешевизна, експресність та ефективність. При цьому вони дозволяють розглядати геологічне середовище як на макрорівні, у даному разі елементів агро- і урболандшафту, так і на мікрорівні – з виходом на мінералогічний та елементний склад досліджуваної речовини як ознаки природних і техногенних процесів у середовищі.

Висновки. На основі існуючих літературних даних та власних натурних спостережень із залученням геофізичних технологій та геопросторових даних визначено високу інформативність магнітних методів при дослідженні об'єктів критичної інфраструктури та їх впливу на навколишнє природне середовище. Як тестовий полігон використано дослідну ділянку "Ржищів" та пункт "Гребені" як об'єкти зсувонебезпечної критичної інфраструктури. За результатами обробки космознімків та вимірювання латеральних та вертикальних розподілів магнітної сприйнятливості ґрунтів і приповерхневих геологічних горизонтів проведено класифікацію ризиків території. Найбільш потенційно небезпечною визначено територію обриву на схилі Дніпра, яка характеризується середніми значеннями магнітної сприйнятливості ґрунтів ($\chi=32-36 \times 10^{-8}$ м³/кг), а також зону поруч із береговою лінією із найбільшою небезпекою обвалів і низькими значеннями магнітної сприйнятливості ($\chi=5-15 \times 10^{-8}$ м³/кг). Антропогенно навантажена (умовно природно-техногенна) територія польової дороги та приватного господарства отримала середню категорію ризиків, у той же час магнітна сприйнятливості для цих ділянок є найвищою ($\chi=50-60 \times 10^{-8}$ м³/кг.). Найбільш ризикостійкою ділянкою є еле-

менти ландшафту, які розташовані у межах земель із мінімальним ухилом та відсутністю антропогенного навантаження – сільськогосподарське угіддя та цілина. При цьому магнітна сприйнятливості чорнозему типового $\chi=38-42 \times 10^{-8}$ м³/кг.

Таким чином, магнітні методи є експресними, ефективними та низьковартісними при дослідженні природних та природно-техногенних процесів, пов'язаних з об'єктами критичної інфраструктури за умови комплексування з іншими геофізичними, ґрунтознавчими методами та ГІС-технологіями.

Підтвердження. Робота виконана в рамках держбюджетної теми № 18БП049-01 "Сучасні технології моніторингу природних та природно-техногенних процесів для оцінки впливу на об'єкти критичної інфраструктури".

Список використаних джерел

- Вижва, С., Шабатура, О., Іванік, О. та ін. (2018). Сучасні технології моніторингу природних та природно-техногенних процесів для оцінки впливу на об'єкти критичної інфраструктури. *Звіт з НДР (промисловий)*. Київ.
- Водяницький, Ю.Н. (2010). Соединения железа и их роль в охране почв. Москва: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии.
- Гузій, М.І., Тяміна, К.М. (2002). Комплексні магнітометричні дослідження найважливіших родючих ґрунтів України для визначення раціонального комплексу агрогеофізичних робіт. *Звіт з НДР*. Балаклія.
- Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 80(1), 40–45.
- Меньшов, О., Сухорада, А. (2017). Основи теорії і методології геофізики ґрунтового покриву: перші результати практичного застосування. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 79 (4), 35–39.
- Меньшов, О.І., Харіна, О.О. (2016). Економічна оцінка інформативності магнетизму ґрунтового покриву при екосистемному сервісі. *Об'єднані наукою: перспективи міждисциплінарних досліджень*, 129–130.
- Alcaraz, C., Zeadally, S. (2015). Critical infrastructure protection: Requirements and challenges for the 21st century. *International journal of critical infrastructure protection*, 8, 53–66.
- Baco, S., Chik, A., Musta, B., Yassin, F.M., Halim, S.A. (2010). Study on magnetic properties, mineralogy and heavy metal content of soil and concretion. *Borneo Science*, 27, 25–34.
- 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.
- Blundell, A., Hannam, J. A., Dearing, J. A., Boyle, J. F. (2009). Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: a reappraisal using an England and Wales database. *Environmental Pollution*, 157 (10), 2878–2890.
- Bučko, M. S., Magiera, T., Pesonen, L. J., Janus, B. (2010). Magnetic, geochemical, and microstructural characteristics of road dust on roadsides with different traffic volumes – Case study from Finland. *Water, Air, & Soil Pollution*, 209 (1–4), 295–306.
- Gadirov, V. G., Eppelbaum, L. V., Kuderavets, R. S., Menshov, O. I., Gadirov, K. V. (2018). Indicative features of local magnetic anomalies from hydrocarbon deposits: examples from Azerbaijan and Ukraine. *Acta Geophysica*, 66 (6), 1463–1483.
- Giannopoulos, G., Dorneanu, B., Jonkeren, O. (2013). Risk Assessment Methodology for Critical Infrastructure Protection. JRC – Scientific and Policy Report.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M. (1988). Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science*, 146 (4), 255–261.
- Hauck, J., Görg, C., Varjopuro, R., Ratamäki, O., & Jax, K. (2013). Benefits and limitations of the ecosystem services concept in environmental policy and

decision making: some stakeholder perspectives. *Environmental Science & Policy*, 25, 13-21.

Helming, K., Diehl, K., Geneletti, D., Wiggering, H. (2013). Mainstreaming ecosystem services in European policy impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 40, 82-87.

Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokl, M., Sukhorada, A., Bondar, K. (2008). Magnetic iron oxides occurring in chernozem soil from Ukraine and Poland as indicators of pedogenic processes. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 52, 255-270.

Jordanova, D., Jordanova, N., Atanasova, A., Tsacheva, T., Petrov, P. (2011). Soil tillage erosion estimated by using magnetism of soils—a case study from Bulgaria. *Environmental monitoring and assessment*, 183 (1-4), 381-394.

Kapicka, A., Dlouha, S., Grison, H., Jaksik, O., Petrovsky, E., Kodesova, R. (2013). Magnetic properties of soils - A basis for erosion study at agricultural land in Southern Moravia. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, 577.

Lourenço, A.M., Rocha, F., Gomes, C.R. (2012). Relationships between magnetic parameters, chemical composition and clay minerals of topsoils near Coimbra, central Portugal. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12 (8), 2545-2555.

Macaulay, T. (2016). Critical infrastructure: understanding its component parts, vulnerabilities, operating risks, and interdependencies. CRC Press.

Maher, B.A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeog. Palaeoclimat. Palaeoecol*, 137, 25-54.

Menshov, O. (2018). Theory and methodology of soil magnetism in geology, ecology and soil science. *XII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13-16 November 2018, Kyiv, Ukraine.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62 (4), 681-696.

Schwertmann, U. (1985). The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals. *Adv. Soil Sci.*, 1, 171-200.

Thompson, R. (2012). Environmental magnetism. Springer Science & Business Media.

Wawer, M., Magiera, T., Ojha, G., Appel, E., Kusza, G., Hu, S., Basavaiah, N. (2015). Traffic-related pollutants in roadside soils of different countries in Europe and Asia. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226 (7), 216.

References

Alcaraz, C., Zeadally, S. (2015). Critical infrastructure protection: Requirements and challenges for the 21st century. *International journal of critical infrastructure protection*, 8, 53-66.

Baco, S., Chik, A., Musta, B., Yassin, F.M., Halim, S.A. (2010). Study on magnetic properties, mineralogy and heavy metal content of soil and concretion. *Borneo Science*, 27, 25-34.

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.

Blundell, A., Hannam, J. A., Dearing, J. A., Boyle, J. F. (2009). Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: a reappraisal using an England and Wales database. *Environmental Pollution*, 157 (10), 2878-2890.

Bučko, M. S., Magiera, T., Pesonen, L. J., Janus, B. (2010). Magnetic, geochemical, and microstructural characteristics of road dust on roadsides with different traffic volumes – Case study from Finland. *Water, Air, & Soil Pollution*, 209 (1-4), 295-306.

Gadirov, V. G., Eppelbaum, L. V., Kuderavets, R. S., Menshov, O. I., Gadirov, K. V. (2018). Indicative features of local magnetic anomalies from hydrocarbon deposits: examples from Azerbaijan and Ukraine. *Acta Geophysica*, 66 (6), 1463-1483.

Giannopoulos, G., Dorneanu, B., Jonkeren, O. (2013). Risk Assessment Methodology for Critical Infrastructure Protection. JRC – Scientific and Policy Report.

Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M. (1988). Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science*, 146 (4), 255-261.

Guziy, M.I., Tyzmina, K.M. (2002). Complex magnetic studies of the most important Ukraine fertile soils for the determining of the optimal work agrogeophysics package. *Report*. Balaklea. [in Ukrainian]

Hauck, J., Görg, C., Varjopuro, R., Ratamäki, O., & Jax, K. (2013). Benefits and limitations of the ecosystem services concept in environmental policy and decision making: some stakeholder perspectives. *Environmental Science & Policy*, 25, 13-21.

Helming, K., Diehl, K., Geneletti, D., Wiggering, H. (2013). Mainstreaming ecosystem services in European policy impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 40, 82-87.

Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokl, M., Sukhorada, A., Bondar, K. (2008). Magnetic iron oxides occurring in chernozem soil from Ukraine and Poland as indicators of pedogenic processes. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 52, 255-270.

Jordanova, D., Jordanova, N., Atanasova, A., Tsacheva, T., Petrov, P. (2011). Soil tillage erosion estimated by using magnetism of soils – a case study from Bulgaria. *Environmental monitoring and assessment*, 183 (1-4), 381-394.

Kapicka, A., Dlouha, S., Grison, H., Jaksik, O., Petrovsky, E., Kodesova, R. (2013). Magnetic properties of soils - A basis for erosion study at agricultural land in Southern Moravia. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, 577.

Lourenço, A.M., Rocha, F., Gomes, C.R. (2012). Relationships between magnetic parameters, chemical composition and clay minerals of topsoils near Coimbra, central Portugal. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12 (8), 2545-2555.

Macaulay, T. (2016). Critical infrastructure: understanding its component parts, vulnerabilities, operating risks, and interdependencies. CRC Press.

Maher, B.A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeog. Palaeoclimat. Palaeoecol*, 137, 25-54.

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

Menshov, O. (2018). Theory and methodology of soil magnetism in geology, ecology and soil science. *XII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13-16 November 2018, Kyiv, Ukraine.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62 (4), 681-696.

Menshov, O., Sukhorada, A. (2017). Basic theory and methodology of soil geophysics: the first results of application. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 79 (4), 35-39. [in Ukrainian]

Menshov, O.I., Kharina, O.O. (2016). Economical assessment of the soil magnetism potential for the ecosystem service. *United by the science: perspectives of the interdisciplinary studies*, 129-130. [in Ukrainian]

Schwertmann, U. (1985). The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals. *Adv. Soil Sci.*, 1, 171-200.

Thompson, R. (2012). Environmental magnetism. Springer Science & Business Media.

Vodyanitskiy, Yu. N. (2010). Heavy metals compounds and their place for the soil defend. Moscow: GNU Soil Institute of Dokuchaev Rossel'hozokademiya. [in Russian]

Vyzhva, S., Shabaturova, O., Ivanik, O. et al. (2018). Modern technologies for the monitoring of the natural and man-made processes for the impact assessment of the critical infrastructure objects. *Report*. Kyiv. [in Ukrainian]

Wawer, M., Magiera, T., Ojha, G., Appel, E., Kusza, G., Hu, S., Basavaiah, N. (2015). Traffic-related pollutants in roadside soils of different countries in Europe and Asia. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226 (7), 216.

Надійшла до редколегії 21.11.18

O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: menshov.o@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

APPLICATION OF MAGNETIC METHODS FOR MONITORING NATURAL AND MAN-MADE PROCESSES ASSOCIATED WITH CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS

Presented are the results of research studies with the attracting of the GIS and geophysical methods for solving the problems of monitoring of dangerous natural and man-made processes at the areas of the critical infrastructure objects location. The possible ways of the magnetic methods applied for the critical infrastructure objects monitoring were considered. The natural and man-made processes associated with the critical infrastructure were defined. Among them are the objects that can influence the changes in soils, atmospheric air composition, as well as near-surface geological horizons. The most important objects are the energy enterprises, chemical industry, transport network, and landslide areas. The "Rzhyshev" section and the "Grebeni" site were used as testing objects of the landslide critical infrastructure. According to the results of processing of cosmoimages and measurements of lateral and vertical distributions of magnetic susceptibility of soils and near-surface geological horizons, the classification of territory risks has been carried out. The territory of the cliff on the slopes of the Dnieper is the most potentially dangerous. Anthropogenically impacted natural and man-made territory of the field road and private economy has received an average category of risks. The most risky part of the site are the elements of the landscape, which are located on the land with a minimum slope, the absence of anthropogenic loading, agricultural land and virgin land. Magnetic methods proved to be rapid, effective and low-cost technology for the study of natural and man-made processes associated with objects of critical infrastructure. The integration with other geophysical, soil science methods, and GIS technologies are required.

Keywords: critical infrastructure, natural and man-made processes, soil, environmental magnetism, magnetic susceptibility.

А. Меньшов, д-р геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: menshov.o@ukr.net
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, Киев, 03022, Украина

ИНФОРМАТИВНОСТЬ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С ОБЪЕКТАМИ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Приводятся результаты научно-исследовательских работ с привлечением геоинформационных и геофизических методов для решения задач по мониторингу опасных природных и техногенных процессов на территории расположения объектов критической инфраструктуры. Был выделен ряд возможных направлений использования магнитных методов с целью мониторинга объектов критической инфраструктуры, а также связанных с ними природных и техногенных процессов. Это объекты, которые могут влиять на изменения почвенного покрова, состав атмосферного воздуха, а также приповерхностных геологических горизонтов. Среди них предприятия энергетической, химической промышленности, а также транспортная сеть и оползнеопасные участки. В качестве тестового полигона выбраны участок "Ржищев" и пункт "Гребени" – как объекты оползнеопасной критической инфраструктуры. По результатам обработки космоснимков и измерения латеральных и вертикальных распределений магнитной восприимчивости почв и приповерхностных геологических горизонтов проведена классификация рисков территории. Наиболее потенциально опасной признана территория обрыва на склоне Днепра. Антропогенно нагруженная природно-техногенная территория полевой дороги и частного хозяйства получили среднюю категорию рисков. Наиболее устойчивыми участками являются элементы ландшафта, которые находятся в пределах земель с минимальным уклоном и отсутствием антропогенной нагрузки – сельскохозяйственное поле и целина. Магнитные методы оказались экспрессными, эффективными и дешевыми при исследовании природных и природно-техногенных процессов, связанных с объектами критической инфраструктуры, при условии комплексирования с другими геофизическими, почвоведческими методиками и ГИС-технологиями.

Ключевые слова: критическая инфраструктура, природные и техногенные процессы, почвы, магнетизм окружающей среды, магнитная восприимчивость.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.411.071

В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: vladvam@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, г. Київ, 03022, Україна

РУДНО-МАГМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА SUKUMALAND (ТАНЗАНИЯ)

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

Подавляющая часть золоторудного потенциала Объединенной Республики Танзании приурочена к системам неогархейских зеленокаменных поясов металлогенической провинции озера Виктория в северо-западной части страны. На основе дешифрирования космических снимков в западной части провинции выделена рудно-магматическая система Sukumaland концентрически-зонального строения. Она образована группой дугообразных зеленокаменных поясов и связанных с ними месторождений золота. Они формируют две дугоподобные ветви: внутреннюю и внешнюю, отличающиеся по особенностям состава и строения. Внутренняя дуга представлена ЗКП Rwamagaza и Kahama с месторождениями золота Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Tembo, Bulyanhulu, внешняя – ЗКП Geita и Mabale-Buhungurica с месторождениями золота Ridge-8, Nyankanga, Geita, Matandani, Kukuluma, Nyanzaga, Kitongo, Golden Ridge, Nyakafuru, Miabu. Их огромный золоторудный потенциал (свыше 50 млн унций золота) обуславливает актуальность изучения этой гигантской структуры.

ЗКП внутренней дуги (Rwamagaza и Kahama) характеризуются преобладанием основных вулканитов, а внешней (Geita и Mabale-Buhungurica) – осадочных и вулканогенно-осадочных образований, в частности слоистых железистых формаций. Соответственно, месторождения золота внутренней дуги преимущественно связаны с основными вулканическими породами (Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Bulyanhulu, Tembo), внешней – со слоистыми железистыми формациями (Geita, Nyankanga, Kukuluma, Matandani).

Особый интерес представляет ядерная часть РМС, где отсутствуют проявления вулканизма и пока не известны месторождения золота либо иных полезных ископаемых, однако напряженный тектонический рисунок структурных элементов свидетельствует о ее значительном рудном потенциале. В целом, наличие многочисленных пространственно сближенных систем радиально-кольцевых разломов свидетельствует о наличии ослабленных зон в надъядерном пространстве гипотетического магматического очага, с которыми могут быть связаны как еще не выявленные месторождения золота разных геолого-промышленных типов, так и проявления диагрового магматизма, в частности, нельзя исключать возможного наличия здесь алмазоносных трубок взрыва.

Предполагается, что РМС возникла и формировалась в ходе сложного многостадийного рудно-магматического процесса под влиянием восходящих потоков глубинных флюидов за счет длительного функционирования области аномально разогретой мантии в этом районе. Рекомендуется при проведении дальнейших геологоразведочных работ учитывать прогнозируемое наличие единой комплексной рудно-магматической системы длительного развития и особенности ее строения.

Ключевые слова: рудно-магматическая система, зеленокаменный пояс, месторождение золота.

Постановка проблемы. Республика Танзания является одной из ведущих золотодобывающих стран мира с годовой добычей около 50 т золота. Основные запасы золота приурочены к металлогенической провинции озера Виктория в северо-западной части страны, где они связаны с рядом зеленокаменных поясов (ЗКП) неогархейского возраста: Geita, Rwamagaza, Kahama, Mabale-Buhungurica, Nzega, Musoma-Mara, Sekenke, Kilimafedha и др. Особый интерес, в силу особенностей их состава и строения, представляет серия ЗКП в западной части провинции, образующих компактную группу концентрически-зонального строения, с которыми связаны многочисленные, часто весьма крупные месторождения золота. Это ЗКП Rwamagaza (месторождения Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru), Kahama (Bulyanhulu), Geita (Ridge-8, Nyankanga, Geita, Kukuluma), Mabale-Buhungurica (Nyakafuru, Golden Ridge, Nyanzaga, Kitongo, Miabu). Очевидно, что распределение золоторудных объектов, общая прогнозная оценка территории, а также возможное наличие иных месторождений самым непосредственным образом зависит от структурной организации этой системы, что обуславливает актуальность ее изучения.

Анализ последних исследований и публикаций. Разработка месторождений золота в районе озера Виктория имеет более чем столетнюю историю. В этой связи степень геологического изучения района относительно высокая. Существует большое количество научных публикаций, в том числе и относительно недавних, посвященных как вопросам региональной геологии, стратиграфии, магматизма (Cook et al., 2016; Kabet et al., 2012; Many and Maboko, 2008; Sanislav et al., 2014¹), так и описанию конкретных ЗКП (Cloutier et al., 2005; Kwelwa, 2010; Kwelwa et al., 2018^{1,2,3}; Sanislav et al., 2014², 2017)

и месторождений (Borg, 1994; Joukoff et al., 2004; Kwelwa, 2017; Van Ryt et al., 2017; Sanislav et al., 2015).

Так, согласно тектонической схеме Танзании (Kabete et al., 2012), изучаемый район расположен в вытянутом в северо-западном направлении супертеррейне Lake Nyanza, сложенной древней континентальной корой с возрастом 3,11 млрд лет, на которую наложены зеленосланцево-амфиболитовые гранит-зеленокаменные террейны с возрастом менее 2,85 млрд лет. Одной из составных частей супертеррейна является золотоносный террейн Sukumaland ромбовидной формы, ограниченный серией разломов северо-восточного и северо-западного направлений. Считается, что он возник в результате сдвиговых движений с северо-западным направлением тектонических напряжений (Kabete et al., 2012).

Важно отметить, что во многих работах подчеркивалась зональная структура совокупности ЗКП западной части провинции озера Виктория, которые рядом авторов выделяются под общим названием Sukumaland (Kwelwa, 2017). Считалось, что внутреннее дугообразное пояса Rwamagaza и Kahama сложены основными вулканитами нижней части серии Nyanzian, а внешние (Geita и Mabale-Buhungurica) – кислыми вулканитами и полосчатыми железорудными формациями (BIF) верхней части серии Nyanzian (Barth, 1990; Borg, 1994; Borg and Krogh, 1999). Однако работы последних лет показали, что на самом деле картина гораздо сложнее и основные вулканиты в виде отдельных тел присутствуют также и во внешних поясах, а их геохимические характеристики, изотопный состав и возраст не отличаются от аналогичных пород внутренних поясов. Источником основных магматических расплавов считается деплетированная мантия MORB, метасоматизированная в результате субдукции в позднеархейском задуговом бассейне с возрастом 2823 млн лет

(Manya and Maboko, 2008). Существуют и другие точки зрения, в частности, по мнению (Cook et al., 2016), метабазальты формации Kiziba в ЗКП Geita возникли в условиях, подобных современным океаническим плато в результате парциального плавления верхней части плюма, который проникал через океаническую кору с поглощением небольшого количества терригенного материала. Установлено (Sanislav et al., 2014²), что рост континентальной коры провинции озера Виктория происходил в три стадии: 2850–2800 млн лет, 2770–2730 млн лет и 2700–2620 млн лет.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В предыдущих работах отсутствует анализ и не приводится объяснение структурных особенностей группы ЗКП в западной части провинции озера Виктория, которые формируют отчетливую концентрически-зональную систему с радиально-кольцевым размещением ее основных элементов. Такой рисунок установлен на основе дешифрирования космических снимков, проведенных автором, и подтверждаются анализом имеющейся научной литературы.

Формулирование целей статьи. Основной целью статьи является обоснование выделения в западной части золоторудной провинции озера Виктория в Республике Танзания рудно-магматической системы (РМС) Sukumaland, объединяющей группу зеленокаменных поясов неогархей и тесно связанных с ними месторождений золота. Предполагается, что она возникла и формиро-

лась в ходе сложного многостадийного рудно-магматического процесса под влиянием восходящих потоков глубинных флюидов за счет длительного функционирования в этом районе области аномально разогретой мантии.

Изложение основного материала исследований.

На основе дешифрирования космических снимков в западной части провинции озера Виктория выделена РМС Sukumaland концентрически-зонального строения. Она образована группой дугообразных зеленокаменных поясов и связанных с ними месторождений золота. Они формируют две дугоподобные ветви: внутреннюю и внешнюю, отличающиеся по особенностям состава и строения. Внутренняя дуга представлена ЗКП Rwamagaza и Kahama с месторождениями золота Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Tembo, Bulyanhulu, внешняя – ЗКП Geita и Mabale-Buhungurica с месторождениями золота Ridge-8, Nyankanga, Geita, Matandani, Kukuluma, Nyanzaga, Kitongo, Golden Ridge, Nyakafuru, Miabu (рис. 1). Их огромный золоторудный потенциал (свыше 50 млн унций золота) обуславливает актуальность изучения этой гигантской структуры (табл. 1). Особый интерес представляет ядерная часть РМС, где отсутствуют проявления вулканизма и пока не известны месторождения золота либо иных элементов, однако напряженный тектонический рисунок структурных элементов свидетельствует о ее значительном рудном потенциале.

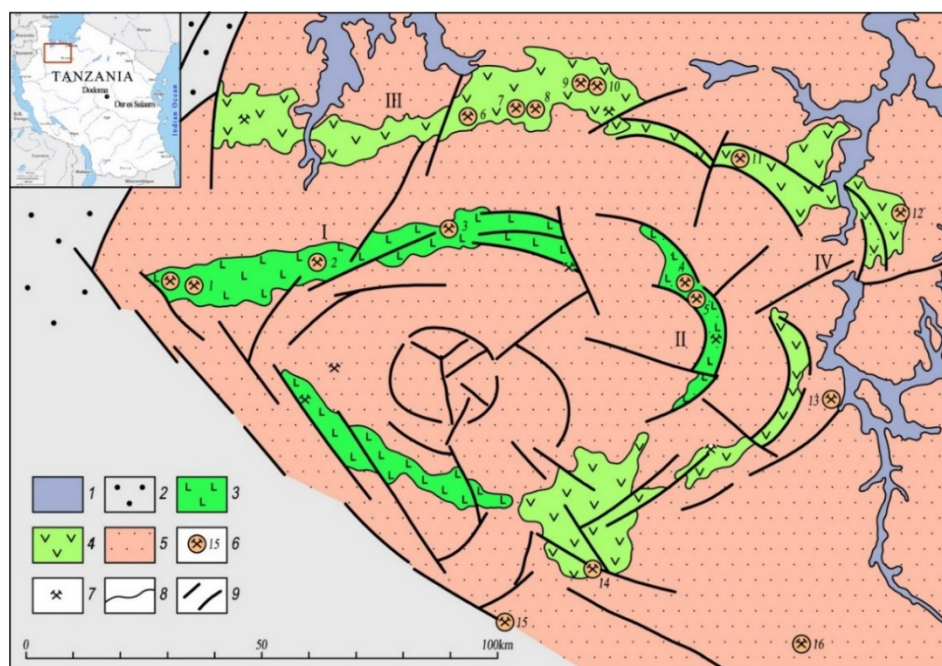


Рис. 1. Схема геологического строения рудно-магматической системы Sukumaland:

- 1 – четвертичные отложения; 2 – протерозой; 3–4 – зеленокаменные пояса: 3 – с преобладанием основных вулканитов (I – Rwamagaza, II – Kahama), 4 – с преобладанием вулканогенно-осадочных толщ (III – Geita, IV – Mabale-Buhungurica); 5 – гранитогнейсы; 6 – месторождения золота (1 – Tulawaka, 2 – Buckreef, 3 – Mawe-Meru, 4 – Tembo, 5 – Bulyanhulu, 6 – Ridge-8, 7 – Nyankanga, 8 – Geita, 9 – Matandani, 10 – Kukuluma, 11 – Nyanzaga, 12 – Kitongo, 13 – Golden Ridge, 14 – Nyakafuru, 15 – Miabu, 16 – Buzwagi); 7 – старательские разработки; 8 – геологические границы; 9 – разломы

Внутренняя ветвь РМС Sukumaland представлена ЗКП Rwamagaza и Kahama с месторождениями золота Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Bulyanhulu, перспективным участком Tembo.

ЗКП Rwamagaza представлен северным сегментом внутренней вулканической дуги РМС Sukumaland субширотного направления длиной до 70 км, шириной до 10–15 км. Сложен смятыми в крутые складки преимущественно основными вулканитами нижней части системы Nyanzian с прослоями и горизонтами осадочных пород и BIF, которые претерпели метаморфизм зеленосланцевой

фации. В центральном секторе ЗКП наблюдаются дайки и силлы метагаббро северо-восточного простирания. Раму пояса слагают древние гранитогнейсовые комплексы архея. Южная граница пояса осложнена бортовыми разломами, к которым иногда приурочены зоны минерализации.

Месторождение Tulawaka (Biharamulo) расположено в западной части ЗКП Rwamagaza, в пределах региональной зоны расщеливания Ushirombo северо-западного направления, среди метаосадочных и метавулканических пород

(туфогенные отложения с прослоями терригенных осадочных пород и маломощными слоями железистых кварцитов), метаморфизованных в высоких стадиях зеленосланцевой до амфиболитовой фации. Породы смяты в крупномасштабную Z-образную складку, погружающуюся в южном направлении, антиклинальная

часть складки срезана надвигом, субпараллельным падающей на юг осевой плоскости складки. С системами трещиноватости, возникшими в результате надвиговых дислокаций, связаны дайки аплитов и ассоциирующие с ними золотоносные кварцевые жилы (*Cloutier et al., 2005; Tulawaka East, n.d.*).

Таблица 1

Ресурсы золоторудных объектов PMC Sukumaland

(*Pittard and Bourne, 2009; Biharamulo gold mine; Bulyanhulu Gold Mine; Indago Resources LTD..., 2009; Lakota resources..., Rift Valley..., 2017; Rwamagaza greenstone belt; Tasman Goldfields..., 2010; Tembo..., 2014; Sanislav et al., 2015; The list of the largest..., 2014; Tulawaka East; 2017*)

ЗКП	Месторождение	Владелец	Ресурсы, млн унций Au	Содержание Au, г/т
Rwamagaza	Tulawaka	Barrick	1,73	11,1
	Buckreef	Gallery	1,1	4,6
	Mawe-Meru		0,74	27,0
	Matabi	Старатели	0,2	-
Kahama (Ushirombo)	Bulyanhulu	Barrick	15,0	9,5
	Tembo*	Lakota	3,0*	-
Geita	Ridge-8	AngloGold	3,3	5,5
	Nyankanga	AngloGold	7,29	4,0
	Geita	AngloGold	6,0	2,5
	Kukuluma	AngloGold	2,0	4,0
	Mugusu	Barrick	0,2	4,5
	Golden Horse	Tan Range	0,3	3,5
Mabale-Buhungurica	Nyakafuru	Gallery	0,73	6,3
	Golden Ridge	Barrick	2,79	3,0
	Kitongo	Gallery	0,55	2,0
	Tusker*	Barrick	4,54*	1,5
	Nyanzaga*	Indago	4,2*	-
	Miabu		0,7	1,7
Всего			54,17	

*прогнозные ресурсы перспективных участков

Выделяется шесть золотоносных участков, основным из которых является Восточная зона северо-западного простирания, падающая под углом 40–65° на северо-восток. Зона локализована в толще преобладающих тонкозернистых осадочных пород обломочного, вулканогенного и хемогенного происхождения, измененных в зеленосланцевой до амфиболитовой фации в тонком переслаивании, с прослоями кремнисто-железистых пород (BIF). Она прослежена по простиранию на 1100 м, а по падению на 100 м. Золотая минерализация приурочена к кварц-турмалиновым жилам с незначительным количеством сульфидов в зоне расслаивания мощностью 30–80 м. Золотоносная кварцевая жила Восточной зоны имеет мощность от 60 см до 4 м (*Rwamagaza greenstone belt, n.d.*).

Золотая минерализация Западной зоны приурочена к зоне расслаивания северо-западного направления на южной границе ЗКП, в которой расположено рассланцованная фельзитовая интрузия. Золото ассоциирует с рассеянной сульфидной вкрапленностью, иногда – с кварцевыми прожилками и маломощными жилами. Протяженность минерализованной зоны 750 м.

Рудные тела представлены крутопадающими залежами прожилковых и жильно-прожилковых арсенопирит-пирит-кварцевых руд, реже вкрапленно-прожилковых руд. Золото встречается преимущественно в виде свободного золота в кварцевых жилах или в штокверках, часто связанных с кислыми интрузиями. Пирит и арсенопирит находятся в небольших количествах и не содержат значительного количества золота. Минерализация размещена в осадочных породах, метаморфизованных в зеленосланцевой и амфиболитовой фациях, а также в сапролите и латеритовых корах выветривания.

Месторождение обрабатывалось с 2005 г. открытым карьером, а в 2008–2013 гг. – подземным способом, со времени начала разработки до конца 2012 г. тут было извлечено 937 154 унции золота (*Biharamulo Gold Mine,*

n.d.; Tulawaka Gold Mine, n.d.). Ресурсы Восточной зоны оцениваются в 1,71 млн унций при содержании золота 14,19 г/т, общие ресурсы месторождения составляют 1,73 млн унций при среднем содержании золота 11,1 г/т (*Rwamagaza greenstone belt, n.d.*).

Месторождение *Buckreef* расположено в центральной части ЗКП *Rwamagaza*, в пределах ослабленной зоны восток-северо-восточного до субширотного направления вблизи северной границы ЗКП. Ее протяженность достигает 8 км, ширина – 5–30 м. Минерализация обычно приурочена к кварцевым жилам в интенсивно измененных основных или ультраосновных породах, иногда с маломощными прослоями пелитовых осадков и кремнистых пород (*Buckreef Gold Mine..., n.d.; Rwamagaza greenstone belt, n.d.; Technical report..., 2011*). Вскрыто две зоны минерализации: Главная протяженностью до 600 м, круто падающая на запад, и Северная протяженностью 250 м, также круто падающая на запад.

Кроме основной зоны *Buckreef* здесь бурением вскрыто еще две высокоминерализованные зоны – *Bingwa* и *Tembo* мощностью 2 м (содержание золота 18 г/т) и 7 м (6,36 г/т) соответственно, прослеженные на глубину свыше 400 м.

Месторождение разрабатывалось компанией *BRMA* подземным способом с конца 80-х годов XX века. Ресурсы месторождения оцениваются в 1,1 млн унций золота при его среднем содержании 4,6 г/т.

В 20 км восточнее известно проявление золота *Buziba*, где золотая минерализация также ассоциирует с кварцевыми жилами в пределах ослабленной зоны среди основных вулканических пород и в виде штокверка среди тела фельзитовых порфиров (*Buckreef Gold Mine..., n.d.*).

Месторождение *Mawe-Meru* расположено в восточной части ЗКП *Rwamagaza*. Его эксплуатация велась в 30–50 годы XX столетия подземными горными выработками путем разработки кварцевых жил с высоким содержанием золота и сульфидов меди. В 1996 г. *Tanganyika*

Gold NL начала разведочные работы на месторождении с целью определения возможности открытия новых рудных тел с высоким содержанием золота с учетом ранее извлеченной продукции и широкой старательской активности. Разведочные работы (RC бурение минерализованной зоны длиной 1,3 км) привели к открытию проявления Busolwa, новых высоких содержаний в Main Reef и минерализации на глубине проявления Lilika. Здесь установлено несколько типов минерализации (*Rwamagaza greenstone belt, n.d.*):

- интенсивно силицифицированные и измененные породы зоны рассланцевания в пироксенитах;
- рассеянный тип;
- силицифицированные и измененные кварц-полевошпатовые порфиры;
- кварцевый штокверк и жилы с пиритом (2–5 %);
- кварцевые жилы в гематитизированных гранитах с серицитом (0,5–1 %).

Ресурсы месторождения оцениваются в 0,74 млн унций золота при среднем его содержании 27,0 г/т.

ЗКП Kahama представлен двумя сегментами внутренней дуги ЗКП Sukumaland: дугообразным, ориентированным в субмеридиональном направлении восточным сегментом протяженностью около 35–40 км и южного сегмента субширотного до запад-северо-западного простирания, протяженностью около 45–50 км. Обнаженность этой структуры крайне низка, по отрывочным наблюдениям пояс сложен преимущественно основными вулканитами, с прослоями осадочных и вулканогенно-осадочных пород. В восточном сегменте пояса известно крупное месторождение Bulyanhulu, а также перспективный участок Tembo, в южном сегменте – отдельные старательские разработки.

Месторождение Bulyanhulu представлено золотоносными кварцевыми жилами зоны рассланцевания северо-западного простирания в зоне сдвига в архейских отложениях восточного сегмента ЗКП Kahama, сложенных основными вулканитами, перекрытыми аргиллитами, сериями пирокластов и пепловых туфов. Рудник включает 5 залежей: Главную, Восточную, Западную, Риф-0 и Риф-2. Доказанные и вероятные запасы на руднике по состоянию на декабрь 2011 г. составляли 28,1 млн т руды с содержанием 11,73 г/т Au (10,63 млн унций), 0,669 % Cu и 9,38 г/т Ag (*Bulyanhulu Gold Mine, n.d.*). Золотая минерализация сосредоточена в крутопадающих кварцевых жилах ("риффах"), которые приурочены к минерализованной зоне северо-западного простирания (310°), круто падающей на северо-восток. Протяженность зоны минерализации составляет 5 км, ширина 2–3 м. Золото ассоциирует с сульфидной вкрапленностью в круто погружающихся риффах. Сульфидная минерализация представлена пиритом и халькопиритом, развивающихся по дымчатому кварцу и рассланцованным аргиллитам. Рудник разрабатывается шахтным способом.

Ресурсы месторождения оцениваются в 15,0 млн унций золота при его среднем содержании 9,5 г/т.

Перспективный участок Tembo расположен в северной части восточного сегмента ЗКП Kahama, на северном продолжении рудоконтролирующих структур месторождения Bulyanhulu. Лицензионная площадь достигает 94 км², на территории участка известны многочисленные старательские разработки. Рудные тела представлены минерализованными кварцевыми жилами и рассланцованными сульфидизированными метавулканическими породами. В отдельных штучных образцах, взятых в районе старательских работ, содержания золота достигают 5–58 г/т. Бурением выявлено несколько крутопадающих золотоносных структур мощностью от 1,0 до 25,89 м с содержаниями золота от

3,13 до 22,81 г/т (*Tembo Gold Corp., 2014*). Прогнозные ресурсы площади оцениваются в 3 млн унций золота (*Lakota Resources Inc., 2006*).

Внешняя ветвь PMC Sukumaland представлена ЗКП Geita и Mabale-Buhungurica с месторождениями золота Ridge-8, Nyankanga, Geita, Kukuluma, Matandani, Mugusu, Golden Horse, Nyakafuru, Golden Ridge, Kitongo, Miabu, перспективными участками Tusker и Nyanzaga,

ЗКП Geita расположен в северной части внешней ветви PMC Sukumaland, вытянут в субширотном направлении почти на 100 км при ширине 10–15 км. ЗКП сложен комплексом зеленокаменных пород, которые включают BIF, туфы, базальты, андезиты и риолиты, а также обломочные осадочные породы (сланцы, аргиллиты, песчаники и конгломераты), метаморфизованные в зеленосланцевой, локально – в эпидиот-амфиболитовой и амфиболитовой фации. Преобладают BIF и турбидитовые формации. К периферии пояса приурочены поздние-, син- и посттектонические интрузии гранитов и гранодиоритов с возрастом 2660–2620 млн лет (*Kwelwa, 2017; Sanislav et al., 2014*²).

К южным флангам ЗКП приурочены метабазаальты толетовой серии комплекса Kiziba, слагающие нижнюю часть разреза ЗКП Geita. Они обогащены легкими редкоземельными элементами, что означает, что источником мантийной магмы были E-MORB. Предполагается, что они возникли на океаническом хребте в задуговом пространстве (*Borg 1994*). Однако есть и другие точки зрения, в частности об их возникновении в условиях подобных современному океаническому плато при частичном плавлении исходного материала примитивной мантии в поле стабильности шпинелевого перидотита в период времени 2830–2820 млн лет (*Cook et al., 2016; Kwelwa et al., 2018*³; *Manya, Maboko, 2008*).

В составе пояса преобладают BIF, переслаивающиеся с турбидитовыми метаосадочными комплексами с прослоями вулканокластических пород, образовавшихся 2699±9 млн лет назад (*Borg, Krogh, 1999; Sanislav et al., 2015*). Гранитоиды и риолиты сильно обогащены легкими редкоземельными элементами, что указывает на их происхождение в условиях континентальной вулканической дуги.

По особенностям геологического строения ЗКП может быть разделен на три блока северо-западной ориентировки (с востока на запад): Kukuluma, Central, Nyamullilima.

Как показали (*Sanislav et al., 2017*), пояс претерпел ряд последовательных деформаций, которые включали ранние стадии пластичного сдвига и складчатости (D1–D5), сопровождавшиеся эпизодическим внедрением интрузий, силлов и даек диоритов и лампрофиров; поздние стадии хрупких и вязких сдвиговых зон и сбросов (D6–D8), которые сопровождались внедрением фельзитовых даек во внутренних частях ЗКП и крупных гранитных тел – на его периферии.

Месторождение Nyankanga приурочено к Центральному блоку ЗКП Geita. Оно было открыто в 1996 г. в результате бурения литохимической аномалии в 100 ppb Au. Площадь месторождения сложена преимущественно BIF, к которым и приурочено золотое оруденение. Железистые кварциты слагают неширокие хребты, окруженные фельзитовыми туфами, стратиграфически перекрывающими BIF. Стратифицированные образования прорваны крупными интрузиями диоритового комплекса Nyankanga дайками сингенетических лампрофиров и постгенетических фельзитов. Эти тела развиты в пределах рудоконтролирующей зоны разлома Nyankanga запад-северо-западного направления, относительно полого (35°) падающего на северо-восток, приуроченного

к контакту BIF и диоритов и минерализованного по всей длине (*Chase et al.; Sanislav et al., 2015*). Широко развиты также сдвиги северо-восточного направления и субширотные сбросы.

Золотая минерализация развита преимущественно в зоне разлома Nyankanga на контакте BIF и диоритов, как правило, в зонах сульфидизации. Их залегание обычно более пологое, чем падение зоны рудоконтролирующего разлома Nyankanga, с погружением на восток-северо-восток под углом около 22°. Минерализация приурочена к зонам брекчирования, силицификации и пиритизации как в железистых кварцитах, так и в диоритах, а также к кварцевым и кварц-карбонатным жилам мощностью до 1 м.

Ресурсы месторождения оцениваются в 7,29 млн унций золота при его среднем содержании 4,0 г/т.

Месторождение Geita расположено в центральной части одноименного ЗКП, в сложно деформированном осадочном пакете Центрального блока, в котором преобладают BIF, прорванные дайками диоритов, в северо-северо-восточной зоне расщепления, к которой приурочены крутопадающие кварцевые жилы субширотного простираения, окруженные маломощными (первые метры) зонами силицификации и сульфидизации. Золото представлено главным образом включениями и рассеянной вкрапленностью в пирите, биотите, вдоль границ зерен кварца, встречается как в виде самородного золота, так и в форме его теллуридов (сильванит, калаверит, нагиагит) (*Van Ryt et al., 2017*). Считается, что месторождение сформировалось на поздних стадиях развития ЗКП, синхронно с развитием хрупко-пластичных деформаций; благоприятными структурными условиями формирования рудных тел служили места пересечения сдвиговых зон и структурных элементов пластических деформаций (оси и шарниры складок), а также контакт между слоями железистых кварцитов и со складчатых диоритовых даек (*Sanislav et al., 2014¹, 2017*). Ресурсы месторождения оцениваются в 6,0 млн унций золота при его среднем содержании 2,5 г/т.

Месторождение Kukuluma и Matandani вместе с участком Area-3 формируют единую золотоносную структуру северо-западного направления протяженностью около 5 км в восточной части ЗКП Geita. Она контролируется крупными зонами расщепления того же направления (*Juma и Kasata shear zones*), сложена преимущественно граувакками, вулканогенно-обломочными породами с горизонтами и прослоями железистых кварцитов, сланцев, кремнистых пород, графитовых сланцев, метабазальтов, прорванных вытянутыми в северо-западном направлении интрузиями и дайками габбро, диоритов, монзонитов (комплекс Kukuluma). К северу от зоны размещается относительно крупная интрузия поздних калиевых порфировых гранитов.

Рудная минерализация приурочена к контактам интрузий комплекса Kukuluma с горизонтами железистых кварцитов, благоприятными структурными факторами являются также зоны дробления, расщепления и шарниры складок. Комплекс представлен тремя группами пород: монзониты и диориты формируют вытянутое на северо-запад тело в центральной части блока, а гранодиориты – разноориентированные дайки и силлы (*Kwelwa, 2017*). Детальное изучение петрогеохимических особенностей пород комплекса позволило выдвинуть предположение, что монзониты и диориты возникли за счет парциального плавления гранат-содержащей нижней части мафической океанической плиты, а гранодиориты – амфиболитов и плагиоклазов, что не согласуется с механизмом субдукции (*Kwelwa et al., 2018¹*).

На месторождении развита зона окисления глубиной до 120 м, а первичная минерализация представлена двумя ассоциациями: арсенопирит-пирротин-магнетит-хлоритовой в брекчированных кремнях и пиритовой в BIF (*Chase et al., n.d.*).

Ресурсы месторождения оцениваются в 2,0 млн унций золота при его среднем содержании 4,0 г/т.

По данным (*Kwelwa et al. 2018²*), возраст кристаллотуфов месторождения Kukuluma соответствует 2717±12 млн лет; двух гранодиоритовых даек и небольшой интрузии гранодиоритов – 2667±17 млн лет, 2661±16 млн лет и 2663±11 млн лет соответственно; минерализованной дайки гранодиоритов на месторождении Matandani – 2651±14 млн лет. Таким образом, формирование месторождений происходило в три стадии: 1) ранняя синседиментационная деформация (D1) – около 2715 млн лет; 2) складчатые (D2–D4) и сдвиговые (D5–D6) деформации под влиянием субмеридионального сжатия, внедрение комплекса Kukuluma – 2700–2665 млн лет; 3) заключительные деформации (D7) в виде формирования системы сбросов, внедрения фельзитовых даек и минерализованных флюидов – около 2650 млн лет.

ЗКП Mabale-Buhungurica представлен разрозненными проявлениями зеленокаменных пород, составляющих восточный сегмент внешней вулканической дуги PMC Sukumaland. В северной части они соединяются с ЗКП Geita, в южной служат южным обрамлением ЗКП Kahama (*Rwamagaza greenstone belt, n.d.*). Пояс сложен преимущественно кремнисто-железистыми формациями с горизонтами и прослоями вулканокластических и обломочных пород, на контакте с гранитными террейнами развиты основные вулканические породы. Здесь известны многочисленные мелкие проявления золотой минерализации и ряд месторождений, наиболее значительные из которых Kitongo, Golden Ridge, Nyakafuru, Miabu.

Перспективная площадь Nyanzaga расположена на крайнем северо-западном фланге ЗКП Mabale-Buhungurica, состоит из ряда лицензий общей площадью 291 км² (*Indago Resources..., 2009; Nyanzaga Gold Project, n.d.*). Площадь сложена серией осадочных и вулканогенных пород системы Niazian, которые разделяются здесь на верхнюю и нижнюю вулканогенные и среднюю осадочную формации. Породы смяты в погружающуюся на северо-северо-запад антиклинальную складку. Оруденение развито в пределах антиформы северо-восточной ориентировки. Оно приурочено к мощным (до 60 м) зонам силицификации, сульфидизации (пирит, пирротин, арсенопирит), встречается в кварцевых жилах. Ресурсы месторождения оцениваются в 4,2 млн унций золота при его среднем содержании 4,0 г/т. Предполагается параллельная разработка месторождения открытым карьером и системой подземных горных выработок.

Месторождение Kitongo расположено на восточных флангах ЗКП, в пределах ослабленной зоны северо-восточного простираения (*Indago Resources..., 2009; Rift Valley..., 2017; Tasman Goldfields..., 2010*). Минерализация локализована в основных вулканических породах, переслаивающихся со средними до кислых вулканическими и осадочными породами, представленными кремнями, BIF и филлитами. Золото встречается в расщепленных основных вулканических туфах и ассоциируется с зонами интенсивного окварцевания и кварцевыми жилами. Зона минерализации прослежена по простираению на 600 м, по падению – на 135 м, из них верхние 80 м представлены окисленными рудами. Кроме того, скважинами вскрыты зоны минерализации в деформированных кварцевых долеритах и кварц-поле-

вошпатовых породах с сульфидами. Общие ресурсы месторождения составляют 550 тыс. унций золота при его среднем содержании 2,0 г/т.

Месторождение *Golden Ridge* расположено во внешнем обрамлении восточного сегмента ЗКП Mabale-Buhurundica, в 30 км к юго-востоку от месторождения Bulyanhulu, принадлежит компании Barrick Gold. Вмещающими являются осадочно-вулканогенные породы верхней части серии Nyanzian, представленные осадками, кислыми вулканитами и BIF. Крутопадающая (50–60°) на восток-северо-восток зона минерализации протяженностью более 2,5 км приурочена к нижней части горизонта BIF, вблизи его границы с вулканокластическими отложениями и конформна залеганию вмещающих пород. Вдоль лежачего края зоны минерализации развиты дайки порфиров. Минерализованная зона сложена сульфидизированными, силицитизированными, брекчированными железистыми кварцитами, ее мощность колеблется от 15 до 30 м. Развита окисленные, переходные и сульфидные руды. Ресурсы месторождения составляют 2,79 млн унций со средним содержанием золота 3 г/т (*African Barrick...*, 2011).

Месторождение *Miabu* приурочено к локальным выходам зеленокаменных пород, преимущественно метаосадков в окружении гранитоидов, южных фрагментов ЗКП Mabale-Buhurundica. Большая часть территории месторождения перекрыта латеритами, поэтому сведения о его геологическом строении крайне фрагментарны. Здесь известны литохимические аномалии золота в пределах крупной структуры северо-восточного простирания длиной 7,7 км, шириной 0,8–1,0 км. Золотая минерализация локализована в серии крутопадающих сдвигов, формирующих эшелонированную структуру северо-восточного простирания. Отдельные золотоносные зоны обычно имеют 400–650 м в длину и от 5 до

60 м в ширину. Минерализация приурочена к рассланцованным, силицитизированным и сульфидизированным основным сланцам, вероятно, метаосадочного происхождения. Ресурсы месторождения составляют 0,7 млн унций золота при его среднем содержании 1,7 г/т (*Rift Valley...*, 2016, 2017).

Во внешней дуге PMC Sukumaland известен и ряд других перспективных объектов, в частности Месторождение Nyakafuru, проявления Tusker и др. (*Pittard and Bourne*, 2009).

Ядерная часть PMC Sukumaland представлена грубо-изометричной структурой в центральной части рудно-магматической системы, размером приблизительно 30 × 40 км, сложенной гранитогнейсовыми комплексами архея в окружении зеленокаменных структур внутренней вулканической дуги. Степень обнаженности этой структуры крайне низка, проявлений вулканизма и золоторудной минерализации здесь не зафиксировано. Однако на космических снимках картируется сетка кольцевых и радиальных разломов, сгущающаяся в центральной части структуры. Высокая степень тектонической проработки, вероятно, может быть связана с надъядерным положением над гипотетическим долгоживущим магматическим очагом, с функционированием которого связано не только возникновение зеленокаменных поясов на фоне плиттктонических процессов, но и внедрение рудоносных флюидов на последних стадиях жизнедеятельности PMC в архейское время (рис. 2). Вероятность использования этих зон рудоносными растворами достаточно велика, что позволяет предполагать наличие здесь месторождений золота нетрадиционного для региона геолого-промышленного типа, в частности большеобъемных зон минерализации в архейских гранитогнейсовых комплексах.

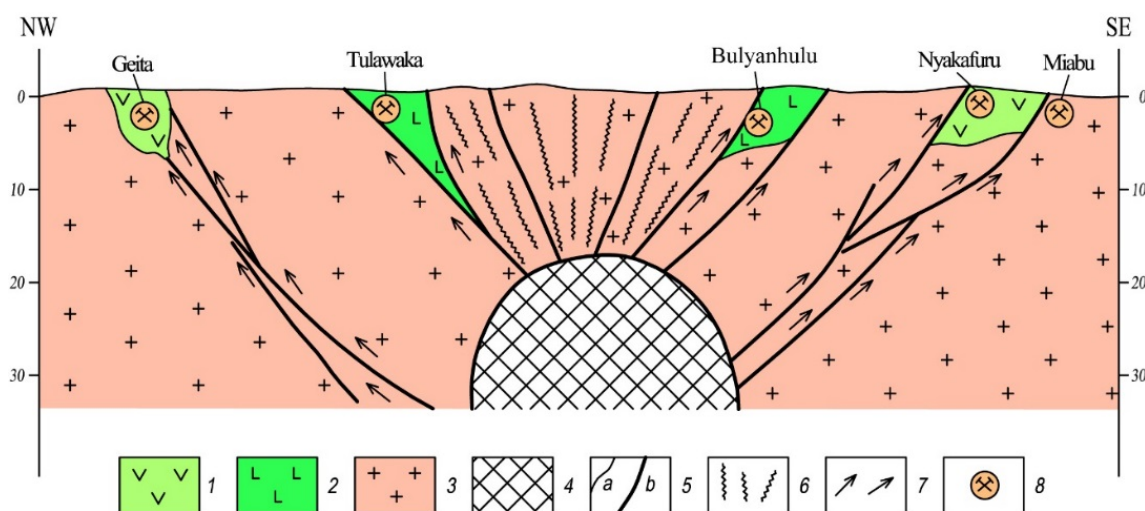


Рис. 2. Гипотетический разрез рудно-магматической системы Sukumaland:

1–2 – зеленокаменные пояса: 1 – с преобладанием средних вулканитов (III – Geita, IV – Mabale-Buhungurica); 2 – с преобладанием основных вулканитов (I – Rwamagaza, II – Kahama); 3 – гранитогнейсы; 4 – гипотетический магматический очаг; 5 – геологические границы (a), разломы (b); 6 – зоны разуплотнения; 7 – направление движения рудоносных флюидов; 8 – месторождения золота

Более того, нельзя исключить возможность того, что сформированные в архее в надъядерном пространстве гипотетического магматического очага ослабленные зоны могли активизироваться в результате более поздних тектономагматических процессов, в частности, в течение мезозойской активизации, когда на различных кратонах Африканского континента, в том числе в пределах Танзанийского щита, происходили процессы диатремового вулканизма и внедрение алмазоносных трубок взрыва. Типичным примером такого рода структур является

алмазоносная трубка Mwadui (рудник Williamson), открытая в 1940 г. в районе г. Shinyanga, которая по сегодняшний день остается единственным в Танзании коренным источником алмазов. В этой связи комплексное изучение ядерной части PMC Sukumaland приобретает особое значение.

Выводы. С системами неоархейских зеленокаменных поясов металлогенической провинции озера Виктория в северо-западной части Танзании связано значительное количество золоторудных месторождений. В западной

части провинции на основе дешифрирования космических снимков выделена рудно-магматическая система Sukumaland. Она характеризуется концентрически-зональным строением, образована группой дугообразных ЗКП, которые формируют две дугоподобные ветви: внутреннюю, представленную ЗКП Rwamagaza и Kahama с месторождениями золота Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Tembo, Bulyanhulu, и внешнюю в составе ЗКП Geita и Mabale-Buhungurica с месторождениями золота Ridge-8, Nyankanga, Geita, Matandani, Kukuluma, Nyanzaga, Kitongo, Golden Ridge, Nyakafuru, Miabu. ЗКП внутренней дуги сложены преимущественно основными вулканитами, а внешней – преимущественно осадочными и вулканогенно-осадочными образованиями, в частности BIF с подчиненными прослоями основных вулканитов. Месторождения золота внутренней дуги, как правило, связаны с основными вулканическими породами (Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Bulyanhulu, Tembo), внешней – со слоистыми железистыми формациями (Geita, Nyankanga, Kukuluma, Matandani).

В ядерной части РМС отсутствуют проявления вулканизма и пока не известны месторождения золота и других полезных ископаемых. Однако здесь развита интенсивная сетка радиально-кольцевых разломов, что свидетельствует о существенной тектонической проработке этой части РМС, что, в свою очередь, может говорить о ее значительном рудном потенциале. Наличие многочисленных пространственно сближенных систем радиально-кольцевых разломов свидетельствуют о наличии ослабленных зон в надъядерном пространстве гипотетического магматического очага, с которыми могут быть связаны как еще не выявленные месторождения золота разных геолого-промышленных типов, так и проявления диатремового магматизма – в частности здесь нельзя исключать возможного наличия алмазоносных трещин взрыва.

Предполагается, что РМС возникла и формировалась в ходе сложного многостадийного рудно-магматического процесса под влиянием восходящих потоков глубинных флюидов за счет длительного функционирования в этом районе области аномально разогретой мантии. Рекомендуются при проведении дальнейших геологоразведочных работ учитывать прогнозируемое наличие единой комплексной рудно-магматической системы длительного развития и особенности ее строения.

Список використаних джерел / Reference

- African Barrick Gold plc. Initial Resource Declared at Golden Ridge Project (2011). Retrieved from <http://www.aciamining.com/~media/Files/A/Acacia/press-release/2011/Golden-Ridge-resource-final-7311.pdf>
- Pittard, K., Bourne, B. (2009). The Geophysical Response of the Tusker Gold Deposit, Lake Victoria Goldfields, Tanzania. Retrieved January 2009, from <https://www.researchgate.net/publication/275194734>
- Barth, H. (1990). Provisional geological map of the Lake Victoria Goldfields, Tanzania, 1:500,000 (with explanation notes). *Geol. Jb.* B 72, 3–59.
- Borg (1994). The Geita Gold deposit in NW Tanzania. Retrieved from [http://www.scrip.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)](http://www.scrip.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q)))
- Borg G., Krogh, T. (1999). Isotopic age data of single zircons from the Archean Sukumaland greenstone belt, Tanzania. *J. African Earth Sci.*, 29 (8), 301–312. DOI: 10.1016/S0899-5362(99)00099-8
- Biharamulo gold mine. (n.d.). Retrieved from <https://www.stam-ico.co.tz/mining-projects/>
- Buckreef Gold Mine Re-development Project. (n.d.). Retrieved from tanzanianroyalty.com/buckreef-gold-mine-re-development-project
- Bulyanhulu Gold Mine, Kahama, Shinyanga. (n.d.). Retrieved from <https://www.mining-technology.com/projects/bulyanhulu-gold-mine-shinyanga/>
- Chase, R., Davidson, A., Michael, H., Skead, M. (n.d.). The Geita and Kukuluma Mineralised Trends, Lake Victoria Goldfield, Tanzania ? Orebody Characteristics and Project Planning. Retrieved from <http://www.onemine.org/document/abstract.cfm?docid=187952&title>
- Cloutier, J., Stevenson, R.K., Bardoux, M. (2005). Nd isotopic, petrologic and geochemical investigation of the Tulawaka East gold deposit, Tanzania

Craton. *Precambrian Research*, 139 (3–4), 147–163. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.06.002>

Cook, Y.A., Sanislav, I.V., Hammerli, J., Blenkinsop, T., Dirks, P.H.G.M. (2016). A primitive mantle source for the Neoproterozoic mafic rocks from Tanzania Craton. *Geoscience Frontiers*. Retrieved from <https://researchonline.jcu.edu.au/42301/6/42301%20Cook%20et%20al%202016.pdf>

Indago Resources LTD. (2009). Scoping Study Results Tanzanian Gold Project. 30 June 2009.

Joukoff, T., Purdey, D., Wharton, C. (2004). Development and Application of Whittle Multi-Mine at Geita Gold Mine, Tanzania. *Ore body Modelling and Strategic Mine Planning*. Perth, WA. 22–24 November 2004, 267–272.

Kabete, J.M., Groves, D.I., McNaughton, N.J., Mruma, A.N. (2012). A new tectonic and temporal framework for the Tanzania Shield: implication for gold metallogeny and undiscovered endowment. *Ore Geol. Rev.*, 48:88–124. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/257026535>

Kwelwa, S. (2010). Geological characterization of the igneous intrusions and wall-rock alteration associated with gold mineralization at Golden Pride deposit, Nzeza District. *A Thesis Submitted in the Fulfillment of the Requirements of the Master of Science (Geology) of the University of Dar es Salaam*. University of Dar es Salaam, September, 2010.

Kwelwa, S. D. (2017). Geological controls on gold mineralization in the Kukuluma Terrain, Geita Greenstone Belt, NW Tanzania. *PhD thesis*. James Cook University. Retrieved from <https://researchonline.jcu.edu.au/49987/>

Kwelwa, S.D., Sanislav, I.V., Dirks, P.H.G.M., Blenkinsop, T., Kolling, S.L. (2018³). The petrogenesis of the Neoproterozoic Kukuluma Intrusive Complex, NW Tanzania. *Precambrian Research*, 305, 64–78. Retrieved from <https://researchonline.jcu.edu.au/51875/>

Kwelwa S.D., Sanislav I.V., Dirks P.H.G.M., Blenkinsop T., Kolling S.L. (2018²). Zircon U-Pb ages and Hf isotope data from the Kukuluma Terrain of the Geita Greenstone Belt, Tanzania Craton: implications for stratigraphy, crustal growth and timing of gold mineralization. *Journal of African Earth Sciences*, 139, 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.027>

Kwelwa, S. D., Dirks, P.H.G.M., Sanislav, I. V., Blenkinsop, T., Kolling, S. L. (2018³). The petrogenesis of the Neoproterozoic Kukuluma Intrusive Complex, NW Tanzania. *Precambrian Research*, 305, 64–78. Retrieved from <https://researchonline.jcu.edu.au/51875/>

Lakota resources Ink. (2006). Focused on properties of merit in Tanzania. Retrieved from <http://www.equitystory.com/Download/Companies/lakotaresources/Presentations/January2006.pdf>

Many, S., Maboko, M.A.H. (2008). Geochemistry of the Neoproterozoic mafic volcanic rocks of the Geita area, NW Tanzania: implications for stratigraphical relationships in the Sukumaland greenstone belt. *J. Afr. Earth. Sci.*, 52, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2008.06.003>

Van Ryt, M. R. Sanislav, I. V., Dirks, P.H.G.M., Huizenga, J. M., Mturi, M. I., Kolling, S. L. (2017). Alteration paragenesis and the timing of mineralised quartz veins at the world-class Geita Hill gold deposit, Geita Greenstone Belt, Tanzania. *Ore Geology Reviews*, December 2017, 91, 765–779. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136816308113>

Nyanzaga Gold Project. (n.d.). Retrieved from <https://www.mining-technology.com/projects/nyanzaga-gold-project/>

Rift Valley Resources Limited. (2016). Resource Extension Drilling commences at Miyabi Gold Project – Tanzania.

Rift Valley Resources Limited. (2017). Arlington Pre-Daba. February, 2017.

Rwamagaza greenstone belt. (n.d.). Retrieved from file:///D:/Documents/International/Tanzania/Internet/Buckreef Gold Mine/Re-Development/Project Tanzania/Royalty/Exploration/Corporation.html

Sanislav, I., Dirks, P.H.G.M., Cook, Y.A., Kolling, S.L. (2014¹). A Giant Gold System, Geita Greenstone Belt, Tanzania / *Acta Geologica Sinica*, 88 (2), 110–111. https://doi.org/10.1111/1755-6724.12368_21

Sanislav, I.V., Wormald, R.J., Dirks, P.H.G.M., Blenkinsop, T.G., Salamba, L., Joseph, D. (2014²). Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotope systematics from late-tectonic granites, Geita greenstone belt: implications for crustal growth of the Tanzania craton. *Precambrian Research*, 242, 187–204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.026>

Sanislav, I. V., Kolling, S. L., Brayshaw, M., Cook, Y. A., Dirks, P.H.G.M., Blenkinsop, T. G., Mturi, M. I., Ruhega, R. (2015). The geology of the giant Nyankanga gold deposit, Geita Greenstone Belt, Tanzania. *Ore Geology Reviews*, 69, 1–16. DOI: 10.1016/j.precamres.2018.02.025

Sanislav, I.V., Drayshaw, M., Kolling, S.L. et al. (2017). The structural history and mineralization controls of the world-class Geita Hill gold deposit, Geita Greenstone Belt, Tanzania. *Mineralium Deposita*, 52 (2), 257–279. DOI: 10.1007/s00126-016-0660-1

Tasman Goldfields acquires. Kitongo Gold Project in Tanzania. (n.d.). Retrieved from <http://www.proactiveinvestors.com.au/companies/news/146196>

Technical report on Tanzanian royalty exploration corporation Buckreef Gold Project in Tanzania by Venmyn Rand (PTY) Limited. (2011). Retrieved from file:///D:/Documents/International/Tanzania/Internet/MD/Filed/by/Filing/Services/Canada/Inc/(403)/717-3898.html

Tembo Gold Corp. (2014). High Grade Gold Exploration in Tanzania. Investor Presentation, Q1 2014.

The list of the largest active mines in Tanzania by 2014. (2014). Retrieved from <https://www.tanzaniainvest.com/mines>

Tulawaka East, Tanzania. (n.d.). Retrieved from <http://www.porter-geo.com.au/database/mineinfo.asp?mineid=mn1030>

Tulawaka Gold Mine. (n.d.). Retrieved from <https://www.mining-technology.com/projects/tulawaka-gold-mine/>

V. Mykhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vladvam@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ORE-MAGMATIC SYSTEM SUKUMALAND (TANZANIA)

The overwhelming part of the gold ore potential of the United Republic of Tanzania is confined to the systems of the Neoproterozoic greenstone belts (GSB) of the metallogenic province of Lake Victoria in the northwestern part of the country. Based on the interpretation of space imagery, in the western part of the province the Sukumaland ore-magmatic system of concentric-zonal structure has been distinguished. It is formed by a group of arched greenstone belts and associated gold deposits. They form two arcuate branches: the internal and external branch, differing in their composition and structure. The internal arc is represented by the Rwamagaza and Kahama GSB with gold deposits of Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Tembo, and Bulyanhulu. The external arc is represented by Geita and Mabale-Buhungurica GSB with gold deposits of Ridge-8, Nyankanga, Geita, Matandani, Kukuluma, Nyanzaga, Kitongo, Golden Ridge, Nyakafuru, and Miabu. Their huge gold potential (over 50 million ounces of gold) stipulates for the urgency of the study of this gigantic structure.

GSB of the inner arc (Rwamagaza and Kahama) are characterized by a predominance of basic volcanic rocks, and GSB of the external arc (Geita and Mabale-Buhungurica) – by sedimentary and volcanic-sedimentary formations, in particular, banded ironstone formations (BIF). Accordingly, gold deposits of the inner arc are mainly associated with basic volcanic rocks (Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Bulyanhulu, Tembo) while gold deposits of the external arc – with BIF (Geita, Nyankanga, Kukuluma, Matandani).

The nuclear part of the ore-magmatic system is of special interest, although manifestations of volcanism are absent there and gold or other mineral deposits are unknown yet, but a tectonic pattern of its structural elements indicates its significant ore potential. In particular, the presence of numerous spatially close systems of radial-circular faults attests to the presence of weakened zones in the space above the core of a hypothetical magma chamber. Gold deposits of different geological and industrial types, yet undiscovered, as well as manifestations of diatreme magmatism may be associated with these weakened zones. In particular, one cannot exclude the possible presence of diamond-bearing volcanic pipes.

It is assumed that the ore-magmatic system has originated and evolved in the course of a complex multi-stage ore-magmatic process under the influence of ascending flows of depth fluids due to the long-term functioning of a zone with anomalously heated mantle in that area. During further geological exploration it is recommended to take into account the predictable availability of a single integrated ore-magmatic system of long development and its structural features.

Keywords: ore-magmatic system, greenstone belt, gold deposit.

В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vladvam@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології",
вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

РУДНО-МАГМАТИЧНА СИСТЕМА SUKUMALAND (ТАНЗАНІЯ)

Переважаюча частина золоторудного потенціалу Об'єднаної Республіки Танзанії приурочена до систем неопроterozoїчних зеленокам'яних поясів металогенічної провінції озера Вікторія в північно-західній частині країни. На основі дешифрування космічних знімків у західній частині провінції виділена рудно-магматична система Sukumaland концентрично-зональної будови. Вона утворена групою дугоподібних зеленокам'яних поясів і пов'язаних з ними родовищ золота. Вони формують дві дугоподібні гілки: внутрішню і зовнішню, що відрізняються за особливостями складу і будови. Внутрішня дуга представлена ЗКП Rwamagaza і Kahama з родовищами золота Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Tembo, Bulyanhulu, зовнішня – ЗКП Geita і Mabale-Buhungurica з родовищами золота Ridge-8, Nyankanga, Geita, Matandani, Kukuluma, Nyanzaga, Kitongo, Golden Ridge, Nyakafuru, Miabu. Їх величезний золоторудний потенціал (понад 50 млн унцій золота) зумовлює актуальність вивчення цієї гігантської структури.

ЗКП внутрішньої дуги (Rwamagaza і Kahama) характеризуються переважанням основних вулканітів, а зовнішньої (Geita і Mabale-Buhungurica) – осадових і вулканогенно-осадових утворень, зокрема шаруватих залізистих формацій. Відповідно, родовища золота внутрішньої дуги переважно пов'язані з основними вулканічними породами (Tulawaka, Buckreef, Mawe-Meru, Bulyanhulu, Tembo), зовнішньої – з шаруватими залізистими формаціями (Geita, Nyankanga, Kukuluma, Matandani).

Особливий інтерес становить ядерна частина РМС, де відсутні прояви вулканізму і поки не відомі родовища золота або інших корисних копалин, однак напружений тектонічний малюнок структурних елементів якої свідчить про її значний рудний потенціал. Зокрема, наявність численних просторово зближених систем радіально-кільцевих розломів вказує на наявність ослаблених зон у надядерному просторі гіпотетичного магматичного вогнища, з якими можуть бути пов'язані як ще не виявлені родовища золота різних геолого-промислових типів, так і прояви діатремового магматизму, зокрема, тут не можна виключати можливої присутності алмазонасних трубкоподібних вибухів.

Передбачається, що РМС виникла і формувалася в ході складного багатостадійного рудно-магматичного процесу під впливом висхідних потоків глибинних флюїдів за рахунок тривалого функціонування в цьому районі області аномально розігрітої мантії. Рекомендується при проведенні подальших геологорозвідувальних робіт враховувати прогнозовану наявність єдиної комплексної рудно-магматичної системи тривалого розвитку і особливості її будови.

Ключові слова: рудно-магматична система, зеленокам'яний пояс, родовище золота.

УДК 553.981, 622.324

В. Хомин¹, д-р геол. наук, проф., зав. кафедри,

E-mail: xbp1381@gmail.com

В. Цюмко², канд. техн. наук, нач. відділу,

E-mail: vtsyomko@ukr.net

Н. Гоптарьова¹, канд. геол. наук, доц.,Н. Броніцька¹, старш. викладач,А. Трубенко¹, студ.,

E-mail: tog@nung.edu.ua

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

²ГПУ "Львівгазвидобування", ПАТ "Укргазвидобування",

вул. Рубчака, 27, м. Львів, 79000, Україна

ГЕОЛОГО-ПРОМИСЛОВІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗКРИТТЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ СЛАБОПРОНИКНИХ ГАЗОНАСИЧЕНИХ ВІДКЛАДІВ

*(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком)**Актуальність досліджень зумовлена науковим обґрунтуванням особливостей розкриття та випробування слабопроникних газоперспективних відкладів.**Під слабопроникними газоперспективними відкладами у Карпатському регіоні Західної України розглянуто породи крейдової системи (обґрунтовано у попередніх наших працях). Відклади крейдової системи у поперечному перерізі Карпатського регіону займають понад половину об'єму породного масиву у межах границь розвитку флішових товщ, причому основна маса в інтервалі глибин 1,5–3,5 км відповідає відкладам стрийської світи верхнього відділу крейдової системи. Тобто об'єкт досліджень досить значний за своїм об'ємом.**При виборі інтервалів перфорації та методів вторинної дії на продуктивний пласт у свердловинах, пробурених у регіонах, де спостерігаються слабопроникні тонкошаруваті флішові утворення (тонкоритмічне перешарування пісковиків, алевролітів та аргілітів), запропоновано методику, за якою для вибору методів вторинної дії на пласт обґрунтовуються інтервали залягання аргілітів. У такому випадку газоперспективні відклади (через збільшення проникності прошарків аргілітів при їх перфоруванні, а в подальшому і у процесі гідравлічного розриву пласта) об'єднуються в один значний за товщиною газонасний експлуатаційний об'єкт, завдяки чому приплив газу до свердловини підвищується.**Цільове розкриття газонасних горизонтів та підвищення їхньої газовіддачі до оптимальних геолого-економічних параметрів потребує використання новітніх технологій, аналогічних до тих, які застосовуються при видобуванні газу зі сланцевих порід.**Моделюванням процесу гідравлічного розриву піщано-аргілітової пачки верхньокрейдових відкладів у інтервалі 3260–3330 м у свердловині 2-Тарасівка за допомогою програми Meers MFrac, доведено збільшення розкритості закріплених тріщин (у даному випадку від 0,02 до 0,22 см), а це сприятиме значному підвищенню провідності тріщини від 668 до 6000 мД·м, що є важливим фактором при видобуванні вуглеводневого газу зі слабопроникних відкладів, і підвищить продуктивність свердловин. У результаті це сприятиме суттєвому підвищенню паливно-енергетичного забезпечення України власною вуглеводною сировиною.**Ключові слова: газонасність, гідравлічний розрив пласта, верхньокрейдові відклади, газоперспективні об'єкти.*

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. На думку багатьох науковців у світі, ХХІ ст. у глобально-енергетичному аспекті має бути "століттям газу". За розрахунками Департаменту енергетики США у 2030 р. значення газу як енергоси у світовій промисловості зросте у 10 разів порівняно з 2003 р., що пов'язується зі значними можливостями його транспортування, меншими шкідливими (ніж у нафтопродуктів, зокрема і вугілля) екологічними наслідками його спалювання, надійнішою (щодо ймовірності техногенних катастроф) технологією використання в різних галузях.

Як відомо, природна газонасність представлена кількома генетичними і, відповідно, промислово-геологічними і технологічно-видобувними типами. До першого належать поклади традиційних родовищ вільного газу у стані суцільної фази у теригенних, карбонатних та інших породах-колекторах. До другого – газ диспергований і оклюдований у різних за літологією щільних породах із мікро- і нанопроникністю (газ у сланцях, газ у щільних пісковиках (породах), вугільний метан). Третій тип представлений метаном, розчиненим у підземних водах; а четвертий – газогідратним метаном (кристалічні сполуки води і газу).

Основний видобуток проходить із традиційних родовищ вільного газу, але в останні роки (переважно в Північній Америці) велику кількість газу видобувають зі слабопроникних порід.

Новітні дослідження показали, що головним серед факторів газонакопичення в щільних породах, насамперед сланцях і кам'яному вугіллі, є нерівномірна гідрофобізація (у результаті як генерації керогеном бітумоїдів, так і наявності сингенетичної вугільної та бітумної органіки). Саме вона ініціює капілярне всмоктування метану

з різних джерел (катагенетична генерація керогеном, водорозчинний метан підземних вод, струминна міграція з великих глибин). Це не тільки роз'яснюєказаний феномен, але й відкриває надійніші критерії пошуків і розвідки сланцевого, вугільного, центрально-басейнового газу. Більш того, у світлі концепції природного капілярного насосу з інжекцією газу в гідрофобні нано- і мікропроникні породні середовища є підстави розглядати їх як нетрадиційні відновні ресурси.

Упродовж останніх 25 років світовий попит на газ зростає високими темпами, що сприяло стрімкому нарощуванню видобутку і збільшенню інвестицій з метою впровадження нових технологій освоєння родовищ. Підвищення цін на паливо зробило ці технології рентабельними та дало змогу розробляти не лише звичайні поклади природного газу, але й видобувати вуглеводневий газ зі слабопроникних порід.

Якщо світові запаси природного газу становлять від 177 до 213 трлн м³, то дослідження запасів сланцевого газу, проведені Управлінням енергетичної інформації Міністерства енергетики США та незалежною консалтинговою компанією Advanced Resources International Inc. для 48 басейнів у 32 країнах світу, показали, що його прогностичні ресурси сягають 1 200 трлн м³ (*Альтернативи газозабезпечення України, 2011*).

Першою країною у світі, якій вдалося подолати значні технологічні, екологічні та економічні проблеми реалізації проектів видобутку газу зі слабопроникних колекторів, були США, які стали світовим лідером із газовидобутку і майже повністю задовольняють внутрішній попит власними ресурсами.

Розробка покладів вуглеводневого газу у слабопроникних породах до недавнього часу не викликала серйозної зацікавленості у світі, тому детальна оцінка запасів нетрадиційного газу за межами Північної Америки досі не зроблена. Вважається, що деякі країни, зокрема: Австралія, Австрія, Індія, Китай, Німеччина, Польща, Франція, Швеція, а також Україна, мають великі запаси такого газу.

За останні роки з'явилися окремі публікації та численні повідомлення щодо ресурсів вуглеводневого газу у слабопроникних породах, що визначаються у трильйонах кубічних метрів на території США, Європи, у т. ч. й на території України.

За опублікованими даними Європейського центру з питань безпеки енергетики і ресурсів (EUCERS), ресурси сланцевого газу лише у Європі становлять понад 17,67 трлн м³ (Kuhn and Umbach, 2011).

На території України перспективними регіонами для пошуків та видобутку такого типу вуглеводневого газу вважаються Східний та Західний нафтогазоносні регіони.

Під газоперспективними слабопроникними відкладами у Карпатському регіоні Західної України нами розглядаються породи крейдової системи. Відклади крейдової системи у поперечному перерізі Карпатського регіону займають понад половину об'єму породного масиву у межах границь розвитку флішових товщ, причому основна маса в інтервалі глибин 1,5–3,5 км відповідає відкладам стрийської світи верхнього відділу крейдової системи. Тобто об'єкт досліджень досить значний за своєю об'ємом.

Таким чином, освоєння ресурсів вуглеводневого газу у слабопроникних відкладах, зокрема і Карпатського регіону, може суттєво підвищити паливно-енергетичне забезпечення України власною сировиною.

Аналіз досліджень і публікацій. При такому великому об'ємі крейдових відкладів звертає на себе увагу той факт, що дуже незначна кількість науковців спрямовувала свої дослідження на газоресурсний потенціал саме цих порід. Серед них можна відзначити З.В. Ляшевича, Л.М. Кузьмика, Р.І. Бакалу, Г.Н. Короткова, причому їх дослідження зосередилися переважно на Вигода-Витвицькому родовищі Долинського нафтогазопромислового району. Окремі роботи з вивчення седиментології, літології та тектоніки крейдових відкладів Українських Карпат опубліковані Ю.М. Сеньковським, А.А. Богдановим, Я.Г. Лазаруком, О.Ю. Полутранком, Г.Н. Доленком, В.С. Буровим, В.В. Глушком, О.С. Вяловим, М.Р. Ладиженським, С.С. Кругловим, Ю.З. Крупським, В.А. Ханіним та ін.

Факти нафтогазоносності верхньокрейдових, зокрема стрийських, відкладів відомі вже давно. Верхня частина відкладів стрийської світи нафтогазоносна у Битківському, Слобода-Рунгурському та Космацькому (на Покутті), Східницькому та Урицькому родовищах. Нещодавно відкрито нафтовий поклад у стрийських відкладах Верхньомасловецького нафтового родовища, що поблизу Борислава. Газоконденсатний поклад виявлено у породах верхньої крейди у склепінній частині Битківської Глибинної складки. Протягом 60–70 рр. XX ст. за традиційними підходами доведено непромислову газоносність двох піщано-аргілітових пачок на Вигода-Витвицькій площі, а пізніше і на площах Шевченківській, Максимівській і Тарасівській.

Поряд з цим необхідно відзначити, що цілеспрямованих пошуково-розвідувальних робіт на стрийські відклади не проводилося, а факти встановлення промислової і непромислової газоносності вказаних відкладів були супутніми даними при опосередкованні палеогенових відкладів Карпатського регіону. Це пояснюється

тим, що верхньокрейдові відклади вважалися низькопроникними і слабопроникними і, за наявної на той час технології та техніки, їх дослідження було економічно неефективним. На сьогодні дослідження слабопроникних газоносних відкладів у зв'язку з можливістю підвищення їх проникності та газовилучення є надзвичайно актуальним, зокрема, у частині видобування газу зі слабопроникних порід внаслідок успіхів у розвитку технології розкриття та випробування такого виду відкладів. Однією з основних технологій освоєння слабопроникних відкладів є гідравлічний розрив пласта (ГРП).

У світовій практиці нафтогазовидобутку ГРП займає чільне місце серед методів інтенсифікації припливу нафти і газу до свердловин та збільшення їх видобувних об'ємів. Тому вже майже 70 років постійно розвивається техніка і технологія ГРП, внаслідок чого вони зазнали суттєвих змін. Для контролю за розкриттям і розвитком тріщини останнім часом у світовій практиці ГРП застосовують теорію К. Нольта (Nolte and Smith, 1981), використання якої стало можливим тільки після застосування сучасних комп'ютерних засобів та вимірювальних приладів за відповідними параметрами.

Розрив пластів використовується з 1866 р., але якщо до 1947 р. для цього застосовували вибухові речовини, то сьогодні небезпека фрекінгу зведена до мінімуму. Місце чорного пороху і нітрогліцерину, що використовувалися на зорі нафтової ери, зайняли вода і гель з дозволеними державою хімічними добавками, концентрації яких значно нижчі за гранично допустимі. Сучасні технології фрекінгу започатковані у 1947 р., коли у США були проведені два перших комерційних гідророзривів.

Уперше у нафтовій промисловості гідравлічний розрив пласта було здійснено в 1947 р. у Сполучених Штатах Америки (Clark, 1949), а вже до 1968 р. у світі було проведено понад мільйон таких операцій.

В Україні застосування ГРП розпочалося на Бориславському родовищі у 1954–1955 рр., під час якого використовували товарну нафту як рідину розриву за малих витрат, а закріплення тріщин проводили піском із концентраціями його у рідині до 50 кг/м³ із загальною масою до 3000 кг. Описано і детально проаналізовано вперше ГРП, який проведений Е. Чекалюком у свердловині 4-Помярки на глибині 1530 м.

На сьогодні на нафтогазових родовищах України проведено тисячі ГРП у свердловинах заглибшки до 6000 м. З 1996 р. вже близько тисячі ГРП здійснено за сучасними технологіями завдяки вітчизняним та закордонним компаніям, у т. ч. проведено багатостадійні ГРП та показано можливість їх застосування для видобутку газу щільних порід, метану чи газу у сланцях.

Успішність і ефективність процесу ГРП сьогодні залежить від вибору об'єктів, правильного проектування та інтерпретації його перебігу, а також від оперативного прийняття правильних рішень при зміні параметрів процесу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми та формулювання цілей статті. Аналізуючи публікації та дискусії, оглянуті вище, можна стверджувати, що думки відрізняються значною розбіжністю у обґрунтуванні напрямів пошуково-розвідувальних робіт, в оцінках ресурсів газу у слабопроникних породах та в особливостях освоєння покладів газу в таких відкладах.

Саме недостатня наукова вивченість цієї проблеми актуалізує дослідження газоперспективних відкладів із метою встановлення їх поширення та оцінки потенціалу, а також екологічні наслідки пошуку та видобування газу з такого типу порід. Стрімкий розвиток сучасних технологій щодо пошуку та видобування газу зі слабопроникних відкладів дозволяє оптимізувати геолого-економічні та еколого-геологічні моделі щодо вивчення слабопроникних

відкладів України. Тобто виникає необхідність детальнішого розгляду окремих особливостей розкриття та випробування слабопроникних газонасичених відкладів.

Виклад основного матеріалу дослідження. За результатами переінтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин, макро- та мікроскопічних описів зразків порід і керна, літологічних особливостей флішових порід у розрізі верхньокрейдових відкладів у регіональному плані, нами (Хомин та ін., 2013; Khomyu et al., 2016) встановлено чергування та локалізацію аргілітових і піщано-аргілітових пачок. Аргілітові пачки завтовшки 200–220 м виступають флюїдоупорами, а піщано-аргілітові із загальною товщиною 150–200 м, у складі яких виділяються слабопроникні породи-колектори, – перспективні в газосному відношенні. Перспективи газосності верхньокрейдових відкладів підтверджуються також даними термогравіметричних досліджень зразків порід щодо підвищеного вмісту розсіяної органічної речовини в них.

Оскільки основні проектні дослідження проводилися на прикладі Тарасівської структури, то далі зазначимо окремі фактичні дані про неї.

Тарасівська структура підготовлена до пошукового буріння по умовному відбиваючому сейсмічному горизонту покрівлі нижньої крейди за результатами робіт сейсморпартій № 56/83 і 56/85 і представлена у вигляді крупної асиметричної антикліналі насувного типу, ускладненої поперечними порушеннями, з крутим зрізаним північно-східним крилом і більш пологим південно-західним. Склепінна частина Тарасівської структури у межах двох уособлених малоамплітудними скидо-зсувами блоків, оконтурена ізогіпсами -4400 і -4600 м. Південно-західне крило структури занурюється до позначки -6800 м. Площа структури обмежена контурами порушень і ізогіпсами -5000 м у північно-західному і -4800 м у південно-східному блоках, становить близько 25 км² (9,8 км x 2 км і 3,9 км x 1,5 км). Амплітуда 500 м.

Параметричними свердловинами 1-Шевченково і 1-Луки і пошуковою свердловиною 4-Максимівська встановлена наявність пластів-колекторів у крейдових відкладах, в яких спостерігалися значні прояви газу і конденсату. У свердловині 2-Тарасівка відклади стрийської світи розкриті в інтервалах: 1310–1600 м – III луска, 1600–3650 м – II луска, 3650–4408 м – I луска Орівської скиби. Стрийська світа складена ритмічним перешаруванням пісковиків, алевролітів, аргілітів, серед яких зрідка зустрічаються шари сірих і зеленуватих мергелів, вапняків, гравелітів і конгломератів. Товщина стрийської світи на ділянках її повного розвитку перевищує 2,5 км.

На цій площі у свердловині 2-Тарасівка промисловою геофізикою виділено чотири водонасичені інтервали, один у менілітовій світі (489–690 м) і три у стрийській світі (1667–1685 м; 2325–2364 м; 4241–4248 м), а також два газонасичені інтервали у стрийській світі (1705–1787 м; 2024–2137 м), де спостерігалися аномальні пластові тиски (Чебаненко та ін., 1986).

У процесі випробування свердловини були отримані припливи газу з відкладів стрийської світи в інтервалах: 1600–1655 м – 2,5 тис. м³/добу; 1710–1750 м – 2,5 тис. м³/добу; 2024–2136 м – 1,5 тис. м³/добу; 3090–3178 м – 0,7 тис. м³/добу; 3266–3322 м – 2,0 тис. м³/добу.

У свердловині 1-Шевченково з відкладів стрийської світи верхньої крейди були одержані: інтервал 6273–6213 м – слабкий приплив газу; 3023–3310 м – дебіт газу 1,3 тис. м³/добу.

У свердловині 2-Тарасівка при проектній глибині 5600 м планувалось пробурити з відбором керна 600 м. В основному у нижній частині розрізу для висвітлення відкладів глибинної Тарасівської складки. Фактично при

досягнутій глибині 4408 м відібрано kern з єдиного інтервалу 2718–2722 м, винос керна становить 2,3 м. Опис керна: аргіліт сірий, щільний, слюдяний некарбонатний, тріщини заповнені кальцитом. Мергель сірий, мікроезернистий. Kern на дослідження не направлявся.

Відбір шламу виконувався відповідно до геолого-технічного наряду через 3 м проходки з таким комплексом досліджень: фракційний аналіз шламу; опис і аналіз складу гірських порід; виділення основної породи і побудова шламодіаграми; визначення карбонатності; визначення щільності і загальної пористості.

У зв'язку з тим, що свердловина 2-Тарасівка не досягла проектної глибини 5600 м, заплановані у геолого-технічному наряді обсяги геофізичних досліджень повністю не виконані. При фактичній глибині 4408 м виконано скорочений комплекс промислово-геофізичних досліджень: стандартний електрокаротаж до глибини 4372 м; кавернометрія, профілометрія до глибини 4378 м; ГГК і НГК до глибини 4278 м; БКЗ, БК до глибини 4107 м; МБК до глибини 3865 м.

За результатами проведених геофізичних досліджень свердловин наведена геофізична характеристика розрізу свердловини та виділені газонасичені колектори, а також пропозиції і рекомендації з виділенням перспективних газонасичених інтервалів та об'єктів для випробування. У відкладах стрийської світи рекомендовані такі об'єкти: I об'єкт – інтервал 3265–3328 м, II об'єкт – інтервал 3090–3170 м, III об'єкт – інтервал 2020–2100 м, IV об'єкт – інтервал 1705–1776 м. Випробування II-IV об'єктів було рекомендовано проводити залежно від отриманих результатів по першому об'єкту.

У свердловині 2-Тарасівка проведено випробування п'ятих об'єктів у відкладах стрийської світи через 245 мм технічної колони за допомогою ВПТ із записом процесу дослідження за допомогою глибинних манометрів. У результаті випробування одержано дані: I об'єкт в інтервалах 3322–3296 м, 3284–3266 м розкритий кумулятивною перфорацією ПКО-89 з щільністю 10 отв. на 1 п.м. Одержано приплив газу з дебітом 2 тис. м³/добу. Довжина факелу газу досягала 0,8–1 м.

За результатами проведеного дослідження можна зробити висновок, що розкритий інтервал газонасний, але об'єм покладу обмежений, тому що зафіксовані величини максимального тиску закритих періодів мали постійну тенденцію до падіння. Це характерно для колекторських різновидів невисокої проникності.

Необхідно відзначити, що умови очистки пласта при випробуванні за допомогою випробувачів пластів на трубах, короткочасність припливу, відсутність умов для інтенсифікації, не дають можливості провести повну оцінку газогідродинамічних характеристик пластів. З метою виключення цих негативних факторів була спущена експлуатаційна колона на глибину 3329 м і випробувано I об'єкт, який розкрито в інтервалах: 3015–3008 м, 3007–2999 м, 2997–2993 м, 2975–2968 м, 2965–2960 м, 2957–2953 м, 2947–2940 м зарядами ПКО-89 з щільністю 18 отв. на 1 п. м.

Отримано слабший приплив газу, $P_{губ} = 29,6$ МПа, $P_{затр} = 35,6$ МПа. З метою інтенсифікації припливу проведено гідророзрив пласта у 2 етапи (міні та потужний ГРП). У пласт було закачано 64 м³ гелю та 4,2 т пропанту. При багаторазових викликах припливу методом аерації отримували газ з продуктами ГРП, які віддавала свердловина. За результатами подальшого свабування свердловини отримано слабкий приплив газу 103 м³/добу.

Таким чином, спуск експлуатаційної колони, обсадження стовбуру свердловини двома колонами і стаціонарне випробування I об'єкта не сприяли отриманню

промислового припливу газу. Очевидно, що при проведенні подальших робіт це треба враховувати і розробляти спеціальні технології розкриття і випробування відкладів стрийської світи.

Враховуючи зазначене вище, наступним важливим етапом науково-виробничих досліджень є обґрунтування можливості видобування потенційних ресурсів газу з такого типу відкладів. При виборі інтервалів перфорації та методів вторинної дії на продуктивний пласт у свердловинах, що пробурені у регіонах де спостерігаються тонкошаруваті слабопроникні флішові утворення (тонкоритмічне перешарування пісковиків, алевролітів та аргілітів) особлива увага зверталася на прошарки пісковиків, рідше алевролітів, які за загальноприйнятою методикою і пропонувалися до випробування. Зважаючи на те, що маємо справу з слабопроникними низькопористими шаруватими (сланцюватими) верхньокрейдовими відкладами, нами пропонується методика, за якою для вибору методів вторинної дії на пласт обґрунтовуються

інтервали залягання аргілітів (рис. 1). Це базується на положенні, що у такому випадку газоперспективні відклади (через збільшення проникності прошарків аргілітів при їх перфоруванні, а в подальшому і у процесі гідророзриву пласта) об'єднуються у один значний за товщиною газonosний експлуатаційний об'єкт, завдяки чому приплив газу до свердловини підвищується. Розроблена нами теоретична модель знайшла своє практичне підтвердження у процесі проведення фактичних робіт при дослідженні свердловини 2-Тарасівка, для якої проводилися проектні роботи щодо можливості та доцільності у подальшому застосування процесів ГРП.

Завданням ГРП є створення і розвиток тріщин у продуктивному пласті шляхом нагнітання у свердловину рідини при високому тиску з подальшим закріпленням цих тріщин за допомогою закріплювачів. Створення нових тріщин чи розкриття існуючих можливе, якщо тиск у пласті під час нагнітання рідини з поверхні стає більшим за геостатичний тиск.

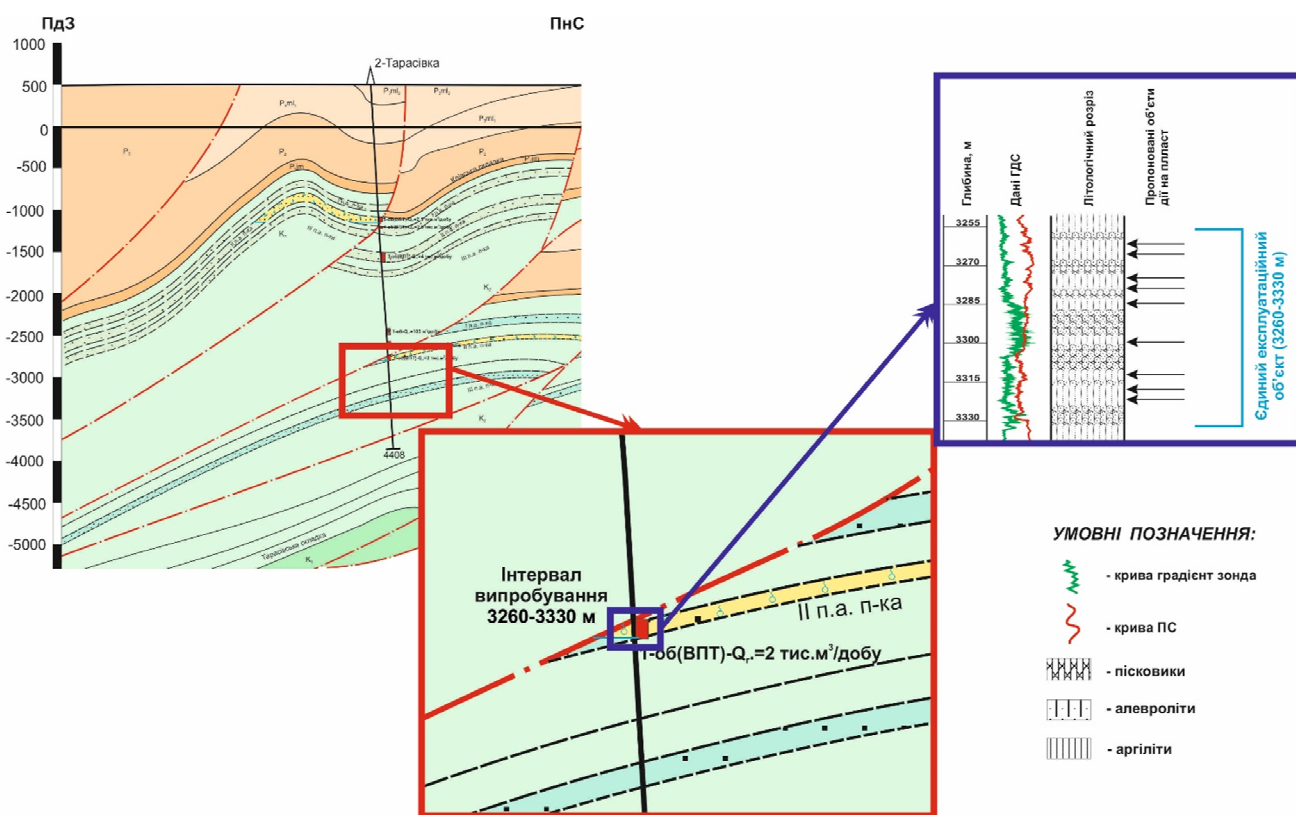


Рис. 1. Методологія вибору об'єктів для перфорації, гідророзриву та випробування у слабопроникних тонкошаруватих відкладах на прикладі розкритого розрізу свердловини 2-Тарасівка

При утворенні тріщини, що відповідає проектній, у неї для закріплення закачують розклинюючий матеріал – пропант. Ця стадія проходить при максимальних тисках і продуктивності для забезпечення максимального розкриття та закріплення утворених тріщин.

Найважливішим фактором успішності процедури ГРП є якість рідини розриву і пропанту, для створення, розкриття та закріплення тріщин. Аналіз результатів застосування ГРП на різних родовищах показав, що кількість вдало проведених операцій гідралічного розриву становить близько 80 %. У решті випадків причиною невідповідності, а іноді і зниження дебіту свердловини є неякісне закріплення тріщини, зумовлене малим або великим вмістом пропанту у робочій рідині чи невідповідність рідини наявним гірничо-геологічним умовам (Нургалієв, 2005).

Загалом технології звичайних ГРП передбачають неглибоке закріплення тріщин і забезпечують дво-трикратне збільшення поточного дебіту нафтових та газових або прийнятності нагнітальних свердловин у пластах проникністю до $0,005 \text{ мкм}^2$, завтовшки не менше 5 м, які залягають на глибинах до 3500 м (Ghauri, 1960; Гаїєв-ронський і Мордвінов, 1983; Глуценко, 1993).

При проведенні ГРП за сучасними технологіями та з використанням неньютонівських рідин, високоміцних закріплювачів тріщин різної фракції можна розвивати і закріплювати тріщини великої півдовжини та провідності, що дозволяє підвищувати продуктивність свердловин із пластів з низькими чи дуже низькими фільтраційно-ємнісними характеристиками. Такий підхід і є основою для видобутку важковидобувних запасів газу.

Для проведення ГРП спочатку здійснюється моделювання продуктивності свердловини та технологічних параметрів процесу з використанням різного програмного забезпечення.

На прикладі свердловини 2-Тарасівка, короткі дані про яку наведені в табл. 1, проведено моделювання технологічних параметрів ГРП у верхньокрейдових відкладах в інтервалі 3260–3330 м з використанням програми Meer MFracs.

Таблиця 1

Параметри для моделювання процесу ГРП верхньокрейдових відкладів у свердловині 2-Тарасівка

Параметри	Інтервал 3260–3330 м
Стратиграфія	Стрийські відклади (K_{2sr})
Дебіт газу, тис. m^3 /добу	2,0
Літологія	Шарування пісковик і аргіліт
Глибина низу пласта, м	3322
Тиск розкриття тріщин, кПа	60259
Модуль Юнга, кПа	64158638
Коефіцієнт Пуассона	0,25
Пластовий тиск, кПа	36234
Проникність, мД	0,007
Пористість, частки одиниці	0,058
В'язкість флюїду, Па·с	10,925
Пластова температура, $^{\circ}C$	88,7
Густина газу, г/л	0,7131–0,7499

Сам процес ГРП заплановано провести з використанням зшитого гелю на основі гідроксіпропілгуару, для приготування якого заплановано використати $156,39 m^3$ води. Ця рідина є загальновідомою та утилізується відповідно до стандартних методик. Необхідно відзначити, що витрати води при даному моделюванні на порядок нижчі від показників, які описані у фактичних матеріалах та літературних джерелах при багатоступеневих гідророзривах на території США. Цим досягається як скорочення загальних витрат води, так і зменшення об'єму рідини для гідророзриву, яка нагнітається у пласт та повертається на денну поверхню після проведення ГРП. Слід зауважити, що продукти розпаду рідини для гідророзриву є вже ньютонівськими рідинами.

На рис. 2 подано динаміку зміни вибієного тиску (синя крива) та тиску в НКТ (червона крива) у процесі ГРП свердловини 2-Тарасівка. Бачимо, що вибієний тиск прогнозується зі значенням близько 65–66 МПа, тиск на усті – 45–47 МПа, при пластовому тиску 36,2 МПа.

Під час проведення ГРП очікується розвиток тріщини півдовжиною до 123 м при максимальній ширині 0,97 см (рис. 3). Окремо потрібно зауважити, що не прогнозується жодного поширення тріщин вище і нижче інтервалу проведення ГРП.

Проведене моделювання дає нам підстави стверджувати, що максимальний радіус поширення тріщин у досліджуваному пласті 123 м і такі дані з високою достовірністю можна проінтерпретувати з позицій кінетики для незворотного процесу.

Аналогічна ситуація спостерігається і при моделюванні розкритості закріпленої тріщини у пласті після проведення процесу ГРП і зменшенні тиску нижче закриття тріщин (рис. 4). У такому разі ширина закріпленої тріщини є значно меншою, максимальне значення її сягає 0,22 см при практично незмінній закріпленій півдовжині тріщини 123 м.

Також, на нашу думку, доцільно навести розподіл провідності тріщин після проведення ГРП у свердловині 2-Тарасівка (рис. 5), на якому бачимо, що вказана провідність тріщин змінюється від 668 до 6000 мД·м, що значно зменшить втрати депресії у привибійній зоні та збільшить площу дренажування, а це є дуже важливим при видобуванні вуглеводневого газу зі слабопроникних порід-колекторів і підвищенні продуктивності свердловин.

Висновки. При виборі інтервалів перфоратії та методів вторинної дії на продуктивний пласт у свердловинах, пробурених у регіонах, де спостерігаються слабопроникні гірські породи (тонкоритмічне перешарування пісковиків, алевролітів та аргілітів), для вибору методів вторинної дії на пласт обґрунтовуються інтервали залягання аргілітів. У результаті чого газоперспективні відклади (через збільшення проникності прошарків аргілітів при їх перфоруванні, а в подальшому і у процесі гідророзриву пласта) об'єднуються в один значний за товщиною газonosний експлуатаційний об'єкт, завдяки чому приплив газу до свердловини підвищуватиметься.

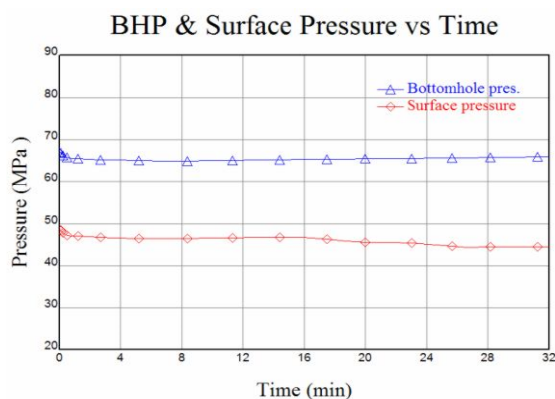


Рис. 2. Проектна динаміка тиску під час проведення ГРП у свердловині 2-Тарасівка

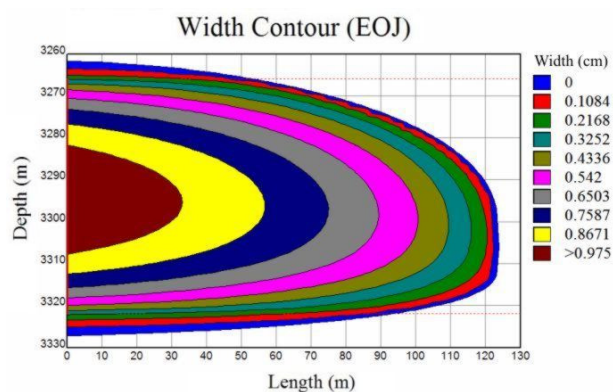


Рис. 3. Моделювання розподілу розкритості тріщини у повздовжньому перерізі під час проведення ГРП у свердловині 2-Тарасівка

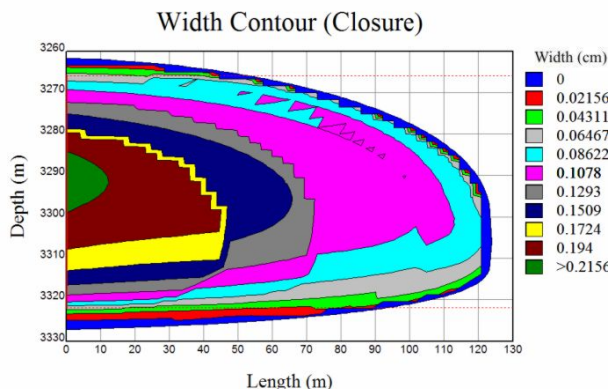


Рис. 4. Моделювання розподілу розкритості тріщин у повздовжньому перерізі після проведення ГРП у свердловині 2-Тарасівка

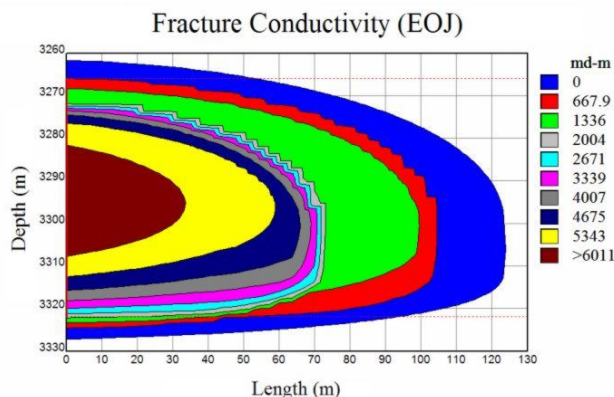


Рис. 5. Розподіл провідності тріщин після проведення ГРП у свердловині 2-Тарасівка

Також комп'ютерним моделюванням процесу гідравлічного розриву піщано-аргілітової пачки верхньокрейдових відкладів у інтервалі 3260–3330 м за допомогою програми Meer MFgas доведено збільшення розкритості закріпленої тріщини (у даному випадку від 0,02 до 0,22 см), а це сприятиме значному підвищенню провідності тріщини від 668 до 6000 мД·м та є важливим фактором при видобуванні вуглеводневого газу зі слабопроникних відкладів, що підвищить продуктивність свердловин. Аналогічна техніко-геологічна ситуація прогнозується і для інших ділянок, наприклад відкладів силуру (Venger et al., 2017) Західно-українського нафтогазоносного регіону, оскільки слабопроникні газонасичені відклади мають значне площинне поширення. Хотілося б відзначити, що практично такий процес ГРП можуть провести фахівці українських нафтогазових компаній, зокрема ПАТ "Укрнафта" та ПАТ "Укргазвидобування". Зазначені підприємства володіють комплексом спецтехніки для ГРП і необхідними матеріалами. На сьогодні працівниками цих компаній проведено близько 1000 свердловинно-операцій з гідророзриву пластів. Причому на підприємствах ПАТ "Укрнафта" при проведенні ГРП не було випадків негативного впливу рідини для гідророзриву на персонал та довкілля.

Необхідно погодитись з дослідженнями (Terence, 2012), якими доведено, що ймовірність забруднення надр та довкілля під час ГРП пов'язана не з самим фактом його проведення, а з помилковим проектуванням, неналежним цементуванням, невірним поводженням із хімічними речовинами.

Таким чином: 1) освоєння ресурсів газу слабопроникних верхньокрейдових (стрийських) відкладів є ресурсно обґрунтованим; 2) цільове розкриття газонасичених горизонтів та підвищення їхньої газовіддачі до оптимальних геолого-економічних параметрів потребує використання новітніх технологій, аналогічних до тих, які застосовуються при видобуванні газу зі сланцевих порід.

Список використаних джерел

- Альтернативи газозабезпечення України: скраплений природний газ (СПГ) та нетрадиційний газ (Аналітична доповідь Центру Разумкова). (2011). *Національна безпека і оборона*, 9, 2–47.
- Гайворонский, И.Е., Мордвинов, А.А. (1983). Гидродинамическое сопротивление скважин. Монография. Москва.
- Глушенко, В.М. (1993). Структуровані рідини для ремонту свердловин. *Нафтова та газова промисловість*, 1, 34–38.
- Нургаліев, О.Т. (2005). Метод и аппаратура для экспрессного определения концентрации проппанта в смесях при гидроразрыве нефтегазоносных пластов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск.
- Хомин, В.Р., Ключа, А.Р., Мончак, Л.С. (2013). Про перспективи відкриття покладів сланцевого газу на Прикарпатті. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 1(46), 13–21.
- Чебаненко, І.І., Орлов, О.О., Жученко, Г.О., Ляху, М.В., Корнілов, Д.Н., Ключко, В.П. (1986). Кількісна оцінка аномально низьких пластових тисків. *Доповіді АН УРСР*, 9, 30–32.

Clark, J.B. (1949). A Hydraulic Process for Increasing the Productivity of Wells. *Society of Petroleum Engineers*, 186, 1–8. doi:10.2118/949001-G.

Ghauri, W.K. (1960). Results of well stimulation by hydraulic fracturing and high rate Oil back flush. *Journal of Petroleum Technology*, 12(6), 19–27. doi:10.2118/1382-G.

Khomyn, V., Monchak, L., Klyuka, A., Klyufinska, I., Shkolna, N. (2016). Gas of the thin layered low penetration upper cretaceous rocks (gas shale rocks) of the Ukrainian Carpathians. *Scientific Bulletin of North University Center of Baia Mare. – Series D, Mining, Mineral Processing, Non-ferrous Metallurgy, Geology and Environmental Engineering*, XXX(1), 33–42.

Kuhn, M., Umbach, F. (2011). EUCERS Strategic Perspectives of Unconventional Gas. A game changer with implication for the EU's energy security. *EUCERS Strategy Paper No. 1*, 1, 52.

Venger, A.R., Khomyn, V.R., Piatkovska, I.O., Klyuka, A.R. (2017). Modeling of gas prospective Silurian terrigenous sediments in the western Ukrainian oil and gas region. *Materials of the XVIth International Conference "Geoinformatics 2017"*, 15–17 May, Kyiv, Ukraine.

Nolte, K.G., Smith, M.B. (1981). Interpretation of Fracturing Pressures. *Journal of Petroleum Technology*, 33(9), 1767–1775. doi:10.2118/8297-PA.

Terence, H. Thorn. (2012). Environmental Issues Surrounding Shale Gas production. The U.S. Experience. *International Gas Union*, April.

References

- Alternative gas supply to Ukraine: liquefied natural gas (LNG) and non-conventional gas (Analytical report of the Razumkov Center) (2011). *National Security and Defense*, 9, 2–47. [In Ukrainian]
- Chebanenko, I.I., Orlov, A.A., Zhuchenko, G.A., Lyakhu, M.V., Kornilov, D.N., Klochko, V.P. (1986). Quantitative Estimation of Anomalous Low Pressures in Natural Oil and Gas-Bearing Pools. *Dopovidi akademii nauk Ukrainiskoi RSR, seriya B –geologichni, khimichni ta biologichni nauki*, 9, 30–32. ISSN: 0002-3523, IDS: E2850. [In Ukrainian]
- Clark, J.B. (1949). A Hydraulic Process for Increasing the Productivity of Wells. *Society of Petroleum Engineers*, 186, 1–8. doi:10.2118/949001-G.
- Gaivoronsky, I.E., Mordvinov, A.A. (1983). Hydrodynamic perfection of wells. Moscow. [In Russian]
- Ghauri, W.K. (1960). Results of well stimulation by hydraulic fracturing and high rate Oil back flush. *Journal of Petroleum Technology*, 12(6), 19–27. doi:10.2118/1382-G.
- Glushchenko, V.M. (1993). Structured liquids for repairing wells. *Oil and gas industry*, 1, 34–38. [In Ukrainian]
- Khomyn, V., Monchak, L., Klyuka, A., Klyufinska, I., Shkolna, N. (2016). Gas of the thin layered low penetration upper cretaceous rocks (gas shale rocks) of the Ukrainian Carpathians. *Scientific Bulletin of North University Center of Baia Mare. – Series D, Mining, Mineral Processing, Non-ferrous Metallurgy, Geology and Environmental Engineering*, XXX(1), 33–42.
- Khomyn, V.R., Klyuka, A.R., Monchak, L.S. (2013). On prospects for opening deposits of shale gas in the Carpathian region. *Exploration and development of oil and gas fields*, 1, 13–21. [In Ukrainian]
- Kuhn, M., Umbach, F. (2011). EUCERS Strategic Perspectives of Unconventional Gas. A game changer with implication for the EU's energy security. *EUCERS Strategy Paper No. 1*, 1, 52.
- Nolte, K.G., Smith, M.B. (1981). Interpretation of Fracturing Pressures. *Journal of Petroleum Technology*, 33(9), 1767–1775. doi:10.2118/8297-PA.
- Nurgaliev, O.T. Method and equipment for express determination of proppant concentration in mixtures with fracturing of oil and gas containing layers. *Extended abstract of PhD thesis*. Tomsk. [In Russian]
- Terence, H. Thorn. (2012). Environmental Issues Surrounding Shale Gas production. The U.S. Experience. *International Gas Union*, April.
- Venger, A.R., Khomyn, V.R., Piatkovska, I.O., Klyuka, A.R. (2017). Modeling of gas prospective Silurian terrigenous sediments in the western Ukrainian oil and gas region. *Materials of the XVIth International Conference "Geoinformatics 2017"*, 15–17 May, Kyiv, Ukraine.

Надійшла до редколегії 19.01.19

V. Khomyn¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof., Head of Department,

E-mail: xbp1381@gmail.com

V. Tsyomko², Cand. Sci. (Techn.), Head of Department,

E-mail: vtsyomko@ukr.net

N. Goptarova¹, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,

N. Bronitska¹, Senior Lecturer,

A. Trubenko¹, Student,

E-mail: tog@nuing.edu.ua

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

²LvivGasVydobuvannya Gas Production Division,

27 Rubchaka Str., Lviv, 79000, Ukraine

GEOLOGICAL AND INDUSTRIAL FEATURES OF DISCLOSURE AND TESTING OF LOW-PERMEABLE GAS-SATURATED SEDIMENTS

The relevance of research is attributed to the scientific justification of the features of disclosure and testing of low-permeable gas perspective deposits.

Under the low-permeable gas perspective deposits in the Carpathian region of Western Ukraine, we consider the rocks of the Cretaceous system (based on previous works). Deposits of the Cretaceous system in the cross section of the Carpathian region occupy more than half the volume of the rock mass within the boundaries of the flysch strata, and the bulk in the depth interval 1.5–3.5 km corresponds to the sediments of the Stryiska suite of the upper section of the Cretaceous system. That is, the object of research is quite significant in its volume.

In selecting the perforation intervals and methods of secondary action on the productive layer in wells drilled in regions where low-permeable thin-layered flysch formations (thin interlayering sandstones, siltstones and mudstones) are observed, we propose a method by which the choice of methods of secondary action on the layer, the intervals of mudstone is justified. In this case, the gas perspective deposits (due to the increase in the permeability of the mudstone layers during their perforation, and later also during the hydraulic fracturing of the layer) are combined into one significant in thickness gas-bearing exploitation object, which increases the flow of gas into the wells.

Target disclosure of the gas horizons and increase of their gas output to optimal geological and economic parameters require the use of new technologies, similar to those used in the extraction of gas from shale rock.

The simulation of the hydraulic fracturing process of the sand-mudstone pack of Upper Cretaceous deposits in the range 3260–3330 m in the well 2-Tarasivka with the Meer MFrac program proved an increase of the fixed crack opening (in this case, from 0.02 to 0.22 cm), which will contribute to significant increase in the conductivity of the crack from 668 to 6000 mD·m, and it is an important factor in the extraction of hydrocarbon gas from low-permeable deposits, which will increase the productivity of wells. And this will contribute to a significant increase in the fuel and energy supply of Ukraine by its own hydrocarbon raw material.

Keywords: gas-bearing, hydraulic fracturing of the layer, Upper Cretaceous deposits, gas perspective objects.

В. Хомин¹, д-р геол. наук, проф., зав. кафедрой,

E-mail: xbp1381@gmail.com;

В. Цемко², канд. техн. наук, нач. отдела,

E-mail: vtsyomko@ukr.net

Н. Гоптарева¹, канд. геол. наук, доц.,

Н. Броницка¹, ст. преподаватель,

А. Трубенко¹, студ.,

E-mail: tog@nuing.edu.ua

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,

ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, 76019, Украина

²ГПУ "Львовгаздобыча", ПАО "Укргаздобыча",

ул. Рубчака, 27, г. Львов, 79000, Украина

ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСКРЫТИЯ И ИСПЫТАНИЯ СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Актуальность исследований обусловлена научным обоснованием особенностей раскрытия и испытания слабопроницаемых газоперспективных отложений.

Как слабопроницаемые газоперспективные отложения в Карпатском регионе Западной Украины нами рассматриваются породы меловой системы (обоснованно в предыдущих наших работах). Отложения меловой системы в поперечном сечении Карпатского региона занимают более половины объема породного массива в пределах границ развития флишевых толщ, причем основная масса в интервале глубин 1,5–3,5 км соответствует отложениям стрийской свиты верхнего отдела меловой системы. То есть объект исследований довольно значительный по своему объему.

При выборе интервалов перфорации и методов вторичного воздействия на продуктивные пласты в скважинах, пробуренных в регионах, где наблюдаются слабопроницаемые тонкослоистые флишевые породы (тонкоритмическое переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов), нами предлагается методика на основе которой для выбора методов вторичного воздействия на пласт обосновываются интервалы залегания аргиллитов. В таком случае газоперспективные отложения (из-за увеличения проницаемости слоев аргиллитов при их перфорировании, а в дальнейшем и в процессе гидравлического разрыва пласта) объединяются в один значительный по толщине газоносный эксплуатационный объект, благодаря чему приток газа в скважины повышается.

Целевое раскрытие газоносных горизонтов и повышение их газоотдачи до оптимальных геолого-экономических параметров требует использования новейших технологий, аналогичных тем, которые применяются при добыче газа из сланцевых пород.

Моделированием процесса гидравлического разрыва песчано-аргиллитовой пачки верхнемеловых отложений в интервале 3260–3330 м в скважине 2-Тарасовка с помощью программы Мейер MFrac, доказано увеличение раскрытости закрепленных трещин (в данном случае от 0,02 до 0,22 см), а это приведет к значительному повышению проводимости трещины от 668 до 6000 мД·м, что является важным фактором при добыче углеводородного газа из слабопроницаемых отложений, и повысит производительность скважины. Что в итоге будет способствовать повышению топливно-энергетического обеспечения Украины собственным углеводородным сырьем.

Ключевые слова: газоносность, гидравлический разрыв пласта, верхнемеловые породы, газоперспективные объекты.

УДК 553.041

А. Балєга, асп.,

E-mail: a_balega@ukr.net

М. Курило, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: kurilo@mail.univ.kiev.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ФІНАНСУВАННЯ СТАДІЙ ГЕОЛОГІЧНОГО ВИВЧЕННЯ НАДР У ВІТЧИЗНЯНІЙ ПРАКТИЦІ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Проаналізовано систему організації і фінансування геологорозвідувальних робіт (ГРР) поза окремими стадіями. Проведено зіставлення стадій та їх фінансового забезпечення в Україні та за кордоном. Встановлено, що в цілому стабільність відповідей схемам, які рекомендовані ООН як міжнародні, але має свою специфіку в частині пошукових і пошуково-оцінювальних робіт. Визначено об'єкти, суб'єкти та основні джерела фінансування робіт відповідно до стадій ГРР.

Встановлено, що рівень державних і недержавних витрат у рамках розвитку мінерально-сировинної бази на законодавчому рівні закріплено Загальнодержавною програмою розвитку мінерально-сировинної бази до 2030 року, він становить 13,8 % та 86,2 % відповідно.

Досліджено структуру державних витрат у межах стадій ГРР. Загальнодержавна програма розвитку МСБ до 2030 року прямо не відображає фінансування ГРР за стадіями. За результатами систематизованої вибірки визначено, що державним коштом забезпечуються роботи всіх 3 стадій від геологічного вивчення території до розвідувальних робіт. Державне фінансування на виконання ГРР припадає виключно на державні інституції, що належать до сфери управління Держгеонадр, хоча відповідно до чинного законодавства виконавцями ГРР за цією програмою є спеціалізовані підприємства всіх форм власності.

З метою виявлення оптимального розподілу фінансування ГРР за стадіями проведено зіставлення показників фінансування за Програмою до 2030 року із розподілом основних геологічних ризиків та загальних ризиків гірничого бізнесу. Так, на I стадії ГРР досить високі геологічні ризики супроводжуються помірними ризиками гірничого бізнесу та незначними питомими витратами для отримання геологічної інформації, при цьому, державним коштом у рамках Програми розвитку МСБ до 2030 року на цих роботах зосереджено 9,91 % загального обсягу фінансування. II стадія ГРР супроводжується вище ніж середнім показником геологічного ризику, високим ризиком гірничого бізнесу та значними витратами, на цих роботах зосереджено 65,71 % державного фінансування. Найнижчі геологічні ризики та ризики гірничого бізнесу притаманні III стадії ГРР, яка є найбільш капіталомісткою, та на фінансуванні якої зосереджено 16,7 % державного фінансування. Даний аналіз дає можливість зробити висновок, що державним коштом забезпечено фінансування найбільш ризикованої стадії ГРР, що у результаті може призвести до неотримання очікуваного якісного геологічного продукту.

Встановлено, що геополітичні виклики зумовили потребу в уточненні робіт у Програмі розвитку МСБ до 2030 року в частині актуалізації об'єктів ГРР, а саме, виключення з напрямів державного фінансування роботи з розвідки (III стадія ГРР) та зосередження фінансування на пошукових та пошуково-оцінювальних роботах (II стадія ГРР), з метою виявлення інвестиційно привабливих об'єктів для подальшої їх аукціонної реалізації. Проект змін передбачає виключення з Програми розвитку МСБ додатка 3, який дає змогу аналізу переліку робіт щодо розвитку МСБ у розрізі груп корисних копалин та стадій ГРР.

Ключові слова: стадії геологорозвідувальних робіт, геологічні ризики, ризики гірничого бізнесу, корисні копалини, державне фінансування, приріст запасів.

Постановка проблеми. Стійкий розвиток економіки України та її енергетична безпека прямо залежить від розвитку гірничої галузі як такої, що дозволяє забезпечити вітчизняну економіку внутрішніми мінеральними ресурсами та залучити інвестиції шляхом їх капіталізації у проведення ГРР та безпосередній видобуток. Ступінь геологічного ризику та ризику гірничого бізнесу кожної зі стадій різний, що впливає на прийняття управлінських рішень щодо необхідності проведення наступної стадії ГРР та вибору джерела фінансування. Світова практика засвідчує, що, як правило, державне фінансування зосереджено на перших стадіях рекогносцировки, які зіставні з вітчизняними роботами стадії "Регіональне геологічне вивчення території та її картування", а фінансовий супровід II стадії "Пошук та пошуково-оцінювальні роботи" та III стадії "Розвідка" забезпечується переважно або виключно приватними недержавними компаніями. В Україні ситуація дещо відмінна. На сьогодні на законодавчому рівні у рамках заходів, визначених Загальнодержавною програмою розвитку МСБ до 2030 року (Закон України..., 2011), державним коштом передбачено фінансування всіх трьох стадій ГРР. Відповідно до висновків колегії Рахункової палати України, за результатами перевірки ефективності використання коштів державного бюджету, спрямованих у 2011–2012 рр. на розвиток мінерально-сировинної бази, Державною службою геології та надр було підготовлено законопроект, що вносить зміни до існуючої Програми розвитку МСБ до 2030 року в частині зосередження державного фінансування досліджень надр в основному на пошукових та пошуково-оцінювальних роботах, з метою виявлення інвестиційно привабливих об'єктів та виключення з Програми робіт з розвідки.

Метою дослідження є аналіз системи фінансування геологічного вивчення надр відповідно до стадій геологорозвідувальних робіт, суб'єктів їх виконання та проведення оцінки динаміки фінансування і прогноз можливих змін у майбутніх періодах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняний та зарубіжний досвід доцільності забезпечення проведення всіх стадій ГРР державою, в особі державних підприємств та приватних недержавних компаній, викладений у працях М. Жикаляка, О. Амоши, І. Андрієвського, О. Боброва, Ж. Варє, С. Кімельмана, М. Колєсника, М. Красножона, Б. Малюка, В. Міщенко та ін. Як зазначається в їх роботах, держава, з ряду об'єктивних причин, зазвичай менш якісно та ефективно веде ГРР, ніж недержавні компанії, та, як висновок, групою авторів пропонується частково відмовитись від бюджетного фінансування геологорозвідувальних робіт, обмежившись регіональними геологічними, геофізичними, геохімічними, гідрогеологічними, екологічними дослідженнями та рядом адміністративно-регулювальних функцій (Жикаляк, 2013).

Виділення раніше не вирішених проблем. Питання стабільності геологорозвідувальних робіт, їх об'єкти та завдання на кожній зі стадій широко досліджується у наукових колах та спеціалістами профільного міністерства та відомства, але не вивчається в контексті доцільності фінансування різними суб'єктами. Ступінь ризику кожної зі стадій геологорозвідувальних робіт у контексті отримання достатньої геологічної інформації для переходу до іншої стадії та обсяг необхідних капіталовкладень є різними. У вітчизняній практиці державне фінансування охоплює всі три стадії геологорозвідувальних робіт, що в результаті призводить до неефективного використання державних коштів та стримування недержавного фінансування суб'єктами підприємницької діяльності.

© Балєга А., Курило М., 2019

Основні результати дослідження. Стадія геологорозвідувальних робіт – частина геологорозвідувального процесу, що визначається притаманними їй об'єктами геологічного вивчення, цілями та методами геологорозвідувальних робіт, вимогами до їх кінцевих результатів. В Україні стадійність геологорозвідувальних робіт (далі – ГРР) на нормативно-законодавчому рівні регулюється положеннями про стадії ГРР на тверді корисні копалини (Положення про стадії геологорозвідувальних робіт на тверді корисні копалини, 2000), на підземні води (Положення про стадії геологорозвідувальних робіт на підземні води, 2001), на нафту та газ (Правила розробки нафтових і газових родовищ, 2017). Дані положення регламентують послідовність проведення геологорозвідувальних робіт (рис. 1) у процесі геологічного вивчення надр з метою картування території України та її окремих регіонів, а також пошуку, розвідки, підготовки до розроблення й експлуатації родовищ корисних копалин, установлює загальні вимоги до змісту, складу, а також

результатів робіт на різних стадіях і підстадіях геологорозвідувального процесу.

Проведення кожної наступної стадії робіт дозволяє отримати якісно нову і кількісно більш повну і точну характеристику об'єкта за мінімальних витрат усіх видів ресурсів.

Норми щодо стадійності ГРР є обов'язковими для виконання їх підприємствами, установами та організаціями, що проводять ГРР повністю або частково за рахунок державного бюджету, та обов'язкові для використання суб'єктами господарювання недержавної форми власності, що проводять ГРР за рахунок власних коштів.

Слід зауважити, що геологорозвідувальні роботи розпочинаються з будь-якої стадії (підстадії), якщо стан геологічного вивчення об'єкта робіт достатній для їхнього геологічного й техніко-економічного обґрунтування. Межі між стадіями (підстадіями) ГРР визначаються вимогами до їхніх кінцевих результатів.

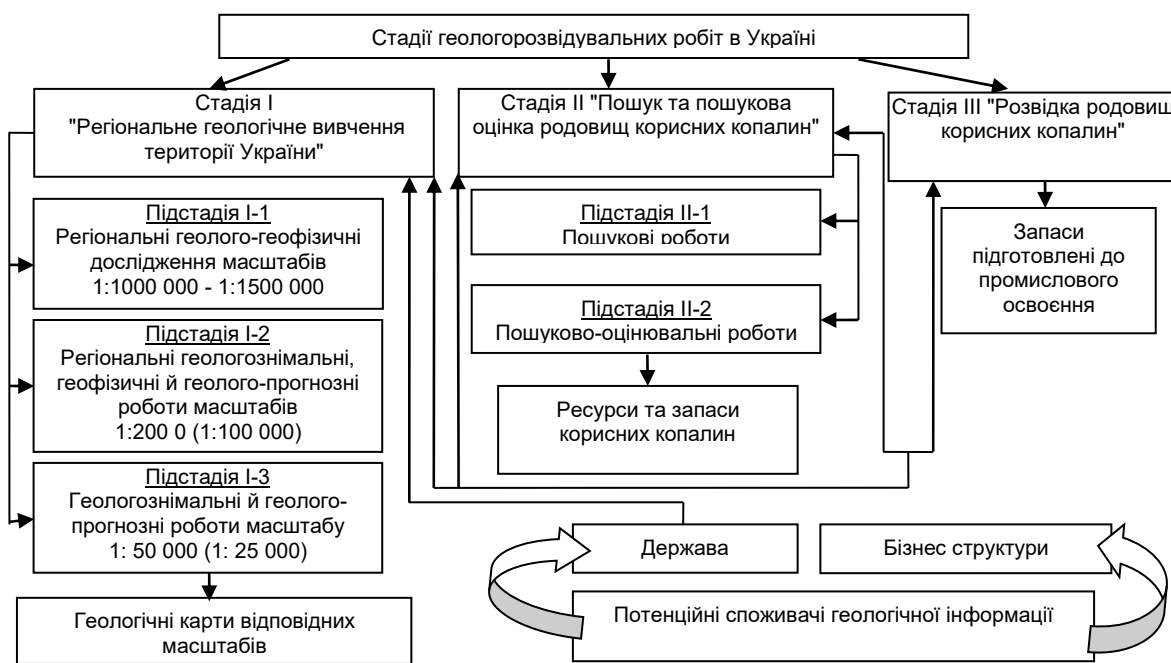


Рис. 1. Стадійність проведення геологорозвідувальних робіт в Україні

Вітчизняна нормативно-правова база визначає 3 стадії ГРР та відповідні підстадії: I стадія "Регіональне геологічне вивчення території України", що включає 3 підстадії, які різняться масштабністю та детальністю вивчення території; II стадія "Пошук та пошукова оцінка родовищ корисних копалин", що включає 2 підстадії, мета яких виявлення корисних копалин та проведення оцінки щодо придатності до промислового освоєння; III стадія "Розвідка родовищ корисних копалин" передбачає підго-

товку родовищ корисних копалин до промислового освоєння. Додаткові розвідувальні роботи, що в разі потреби виконуються за окремим геологічним завданням (наприклад, за рекомендацією державної комісії по запасам України або побажанням інвестора), належать до стадії розвідки родовищ корисних копалин. Ця стадійність у цілому відповідає схемі стадійності, яка використовується на пострадянському просторі та рекомендується ООН як міжнародна (табл. 1).

Таблиця 1

Стадії геологічного вивчення надр за схемою, що прийнята в Україні і рекомендована ООН

Україна	Стадійність рекомендована ЕЕКООН	Об'єкт	Суб'єкти
Регіональне геологічне вивчення	Reconnaissance (рекогносцировка)	Геологічні області (райони)	Держава в особі державних підприємств та профільних відомств
Пошуки та пошуково-оціночні роботи	Prospecting (пошуки)	Перспективна зона (район)	Державні підприємства. Приватні геологічні підприємства. Геологічні служби гірничодобувних компаній
	General Exploration (загальні дослідження/ розвідка)	Родовище	Приватні геологічні підприємства. Геологічні служби гірничодобувних компаній. Державні підприємства
Розвідка	Detail Exploration (детальні дослідження/ розвідка)	Родовище або його частина	Геологічні служби гірничодобувних компаній. Приватні геологічні підприємства. Державні підприємства

Як видно з табл. 1, у країнах з ринковою економікою виділяється самостійна стадія оцінки родовищ, оскільки після проведення пошуків за схемою, прийнятою ООН та МАГАТЕ, виконується геолого-економічний аналіз виявлених об'єктів, який визначає необхідність проведення наступної (оцінювальної) стадії геологорозвідувальних робіт. Крім того, за державні (бюджетні) кошти виконуються тільки регіональне геологічне вивчення, оскільки пошуки належать до робіт високого ризику для капіталу. У той же час в Україні держава фінансує пошукові, а часто і пошуково-оцінювальні роботи, сподіваючись продати виявлені родовища на умовах тендеру можливим майбутнім інвесторам (Михайлов, 2006).

Основними джерелами фінансування геологорозвідувальних робіт у рамках розвитку мінерально-сировинної

бази України відповідно до чинної нормативно-правової бази є кошти державного бюджету та інші джерела фінансування. Обсяги бюджетного фінансування щорічно визначаються Законом України "Про державний бюджет" на відповідний рік у рамках чинної бюджетної програми КПКВК 2404020 "Розвиток мінерально-сировинної бази" за відповідними напрямками використання коштів. Фінансування з інших джерел передбачає фінансування приватного бізнесу за рахунок власних коштів, інвестицій, боргових коштів. Плановий показник державного та недержавного фінансування визначено Загальнодержавною програмою розвитку мінерально-сировинної бази України до 2030 року (Закон України..., 2011) (табл. 2).

Таблиця 2

Обсяги фінансування заходів, передбачених Загальнодержавною програмою розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року*

Показники	Усього	Державний бюджет	Інші джерела фінансування
Усього по Програмі (2011-2030 рр.), у т. ч. за етапами:	189053,99	26119,13	162934,86
Питома вага, %	100,0	13,8	86,2
1 етап (2011-2012 рр.)	12420,12	1730,42	10689,7
Питома вага, %	100,0	13,9	86,1
2 етап (2013-2020 рр.)	64834,66	8952,04	55882,62
Питома вага, %	100,0	13,8	86,2
3 етап (2021-2030 рр.)	111799,21	15436,67	96362,54
Питома вага, %	100,0	13,8	86,2

*складено за даними (Закон України..., 2011)

Відповідно до паспорту Програми розвитку МСБ до 2030 року фінансування заходів передбачено у розмірі 189053,99 млн грн, у т. ч.: за рахунок державного бюджету – 26119,13 млн грн, що становить 13,8 %, інших джерел 162934,86 млн грн, що становить 86,2 %. Виконання заходів Програми розвитку МСБ до 2030 року було передбачено в 3 етапи: перший етап (2011–2012 роки) становить 6,6 % від загального обсягу фінансування, 2 етап (2013–2020) – 34,3 %, 3 етап (2021–2030) – 59,1 %.

При формуванні додатку 2 до Програми розвитку МСБ до 2030 року було допущено ряд технічних помилок і некоректних даних у частині прогнозного обсягу фінансових ресурсів для виконання завдань Програми, а саме: прогнозований обсяг фінансування ресурсів для виконання повного комплексу завдань та заходів фінансування за Програмою було відображено із заниженням на 29,75 млн грн, у т. ч. за рахунок державного бюджету на 29,74 млн грн, інших джерел на 0,01 млн грн. Враховуюче вищевикладене, подальші розрахунки

будуть відображені з врахуванням виправлених технічних помилок.

Загальнодержавна програма розвитку МСБ до 2030 року прямо не відображає фінансування геологорозвідувальних робіт за стадіями. Але за результатами вибірки, що відображено та систематизовано у табл. 3, можна стверджувати, що державним коштом забезпечуються роботи всіх 3 стадій від геологічного вивчення території до розвідувальних робіт. Так, державне фінансування робіт з геологічного вивчення території України (I стадія ГРР) передбачено забезпечити на 2591,23 млн грн, що в загальному обсязі фінансування становить 9,91 %, фінансування робіт з пошуку та пошукової оцінки родовищ корисних копалин (II стадія ГРР) передбачено в обсязі 17182,08 млн грн, що становить 65,71 %, фінансування робіт з розвідки родовищ корисних копалин (III стадія ГРР) становить 4366,08 млн грн, або 16,7 %, показник фінансування позастадійних робіт становить 2009,48 млн грн, або 7,68 %.

Таблиця 3

Державне фінансування геологорозвідувальних робіт в Україні в рамках виконання Програми розвитку МСБ до 2030 року – стадійний аспект

Стадії	Обсяг витрат за етапами, млн грн			Усього по Програмі (2011–2030 рр.)	Питома вага, %
	1 етап (2011–2012 рр.)	2 етап (2013–2020 рр.)	3 етап (2021–2030 рр.)		
1 стадія ГРР	173,46	887,53	1530,24	2591,23	9,91
2 стадія ГРР	1184,62	5871,97	10125,49	17182,08	65,71
3 стадія ГРР	278,94	1503,44	2583,7	4366,08	16,70
Позастадійні роботи	132,12	689,1	1188,26	2009,48	7,68
Всього	1769,14	8952,04	15427,69	26148,87	100,00

*складено за даними (Загальнодержавна програма розвитку..., 2011)

Слід зауважити, що державне фінансування на виконання ГРР припадає виключно на державні інституції, що належать до сфери управління Держгеонадр, хоча відповідно до Порядку використання коштів, передбачених у державному бюджеті для розвитку мінерально-сировинної бази (Порядок використання коштів..., 2011), виконавцями геологорозвідувальних робіт за цією

програмою є спеціалізовані підприємства всіх форм власності. Обсяг фінансування бюджетної програми КПКВ 2404020 "Розвиток мінерально-сировинної бази України" у 2018 р. передбачено в розмірі 100,0 млн грн, з них станом на кінець 3 кварталу 2018 р. через систему "Державні закупівлі" укладено договорів на виконання геологорозвідувальних робіт з розвитку МСБ на 94,0 млн грн виключно

з установами та організаціями державної форми власності, що належать до сфери управління Держгеонадр: КП "Південукргеологія" на 10,1 млн грн, КП "Кіровгеологія" на 6,1 млн грн, ДРГП "Донецькгеологія" на 4,7 млн грн, ДРГП "Східне" на 1,8 млн грн, ДРГП "Причорноморське" на 10,3 млн грн, ДП "Укргеофізика" на 19,0 млн грн, ДП "Українська геологічна компанія" на 10,1 млн грн, ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд" на 9,0 млн грн, НАК "Надра України" на 7,7 млн грн, Український державний геологорозвідувальний інститут 10,1 млн грн, територіальні інспекції державного геологічного контролю – 5,1 млн грн (*Державні закупівлі замовника...*, н.д.).

Орієнтовно розподіливши обсяги фінансування вищевказаних робіт у межах укладених угод за стадіями ГРР, можна зробити висновок, що у 2018 р. держава планує профінансувати роботи за I стадією ГРР "Регіональне геологічне вивчення території" на 12,7 млн грн,

або на 13,5 % від загального обсягу укладених угод; за II стадією "Пошук та пошукова оцінка родовищ корисних копалин" на 34,3 млн грн, що становить 36,5 %; за III стадією "Розвідка родовищ корисних копалин" на 4,3 млн грн, або 4,6 %; на позастандартні роботи – 42,7 млн грн, що становить 45,4 %.

З метою виявлення оптимального розподілу фінансування ГРР за стадіями проведено зіставлення показників фінансування за Програмою до 2030 року із розподілом основних геологічних ризиків та загальних ризиків гірничого бізнесу (рис. 2). При цьому під геологічним ризиком розуміють вірогідність непідтвердження кількості та якості запасів та ресурсів корисних копалин. Під ризиком гірничого бізнесу розуміють імовірність неопукності інвестицій у ГРР та реалізації геологічних та гірничих проектів.

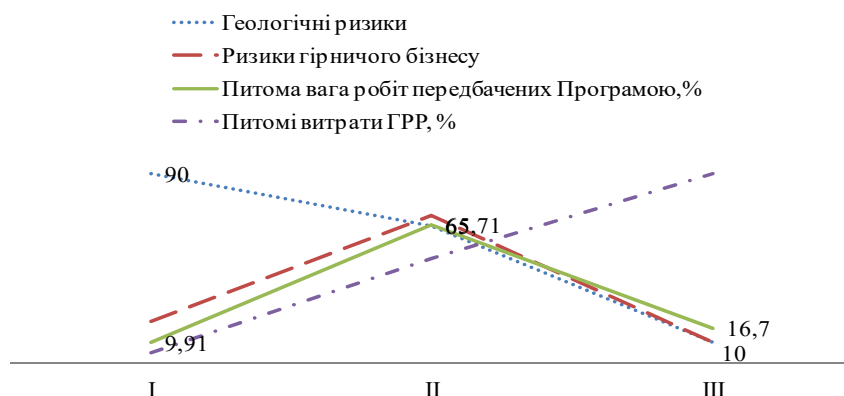


Рис. 2. Співвідношення геологічних ризиків та ризиків гірничого бізнесу з розподілом державного фінансування ГРР за Програмою до 2030 року

Так, на I стадії ГРР досить високі геологічні ризики супроводжуються помірними ризиками гірничого бізнесу (неопукності капіталовкладень) та незначними питомими витратами для отримання геологічної інформації, при цьому державним коштом у рамках Програми розвитку МСБ до 2030 року на цих роботах зосереджено 9,91 % загального обсягу фінансування. II стадія ГРР супроводжується вищим за середній показником геологічного ризику, високим ризиком гірничого бізнесу (неопукності капіталовкладень) та значними витратами, на цих роботах зосереджено 65,71 % державного фінансування. Найнижчі геологічні ризики та ризики гірничого бізнесу (неопукності) притаманні III стадії ГРР, яка є найбільш капіталомісткою та на фінансуванні якої зосереджено 16,7 % державного фінансування. Даний аналіз дає можливість зробити висновок, що державним коштом забезпечено фінансування найбільш ризикованої стадії ГРР, що в результаті може призвести до неотримання очікуваного якісного геологічного продукту та неефективного використання державних коштів.

Загалом, Програмою до 2030 року фінансування державним коштом ГРР на паливно-енергетичні ресурси заплановано 16397,23 млн грн, у т. ч. на пошук та пошукову оцінку зосереджено 14646,15 млн грн, або 89,3 %, на розвідку – 1751,08 млн грн, або 10,7 %; на металічні корисні копалини виділено 1940,45 млн грн, у т. ч. на роботи з пошуку та пошукової оцінки на суму 1334,32 млн грн, або 68,8 %, на розвідку – 606,03 млн грн, або 31,2 %; на неметалічні корисні копалини закладено 606,11 млн грн, у т. ч. на пошуки та пошукову оцінку – 391,22 млн грн, або 64,5 %, на розвідку – 214,89 млн грн, або 35,5 %. Тобто державна політика з розвитку МСБ у рамках постадійного фінансування ГРР на різні групи корисних копалин (паливно-енергетичні ресурси,

металічні та неметалічні ресурси) має стійку тенденцію до надання переваг у фінансуванні II стадії робіт, незважаючи на досить високий рівень ризиків, пов'язаних із цією стадією ГРР (рис. 3, 4).

Держава, забезпечуючи інституційний та фінансовий супровід II та III стадії ГРР, які є досить дорогавартісними та ризикованими за змістом та отриманням "геологічного продукту", не стимулює, а непрямым чином може навіть блокувати активність недержавних інституцій щодо фінансування та проведення таких робіт.

На сьогодні профільним відомством – Державною службою геології та надр України розроблено та оприлюднено проект Закону України "Про внесення змін до Закону України "Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року". Як зазначено в повідомленні про оприлюднення вищевказаного законопроекту, його розроблення зумовлене рекомендаціями Висновку колегії Рахункової палати України до Звіту про результати перевірки ефективності використання коштів державного бюджету, спрямованих у 2011–2012 рр. на розвиток мінерально-сировинної бази, від 11 квітня 2013 року № 22/6-2 та необхідністю актуалізації положень програми з врахуванням загроз енергетичній безпеці держави, пов'язаних із тимчасовою окупацією території АР Крим та міста Севастополя. Слід зауважити, що нестабільне та обмежене фінансування першого етапу чинної Програми (2011–2012 роки) призвели до втрат темпів геологорозвідувального процесу; втрати актуальності низки завдань через відсутність реальних проявів і родовищ деяких видів корисних копалин. Нова редакція Програми передбачає концентрацію робіт на пріоритетних напрямках розвитку мінерально-сировинної бази; зосередження державного фінансування досліджень надр

в основному на пошукових та пошуково-оцінювальних роботах з метою виявлення інвестиційно привабливих об'єктів (*Повідомлення про оприлюднення проекту Закону України..., 2017*) (табл. 4).

Загалом фінансування Програми планується зменшити на 54,5 %, з 189083,74 млн грн до 85975,06 млн грн, за рахунок скорочення фінансування за державний кошт на 38,3 % з 26148,87 млн грн до 16123,56 млн грн та зменшення планових обсягів фінансування за рахунок інших джерел фінансування на 57,1 % з

162934,87 млн грн до 69851,5 млн грн. Зменшення фінансування за рахунок державних коштів передбачається за рахунок зменшення фінансування заходів з розвитку МСБ паливно-енергетичних ресурсів на 53,1 %, металічних корисних копалин на 53,5 %, гідрогеологічних, інженерно-геологічних та еколого-геологічних робіт на 45,9 % та, навпаки, збільшення обсягів фінансування робіт з розвитку МСБ на неметалічні корисні копалини на 1 %, регіональних досліджень території України та науково-методичне (інформаційне) забезпечення на 27,1 %, на технічне переоснащення на 100 %.

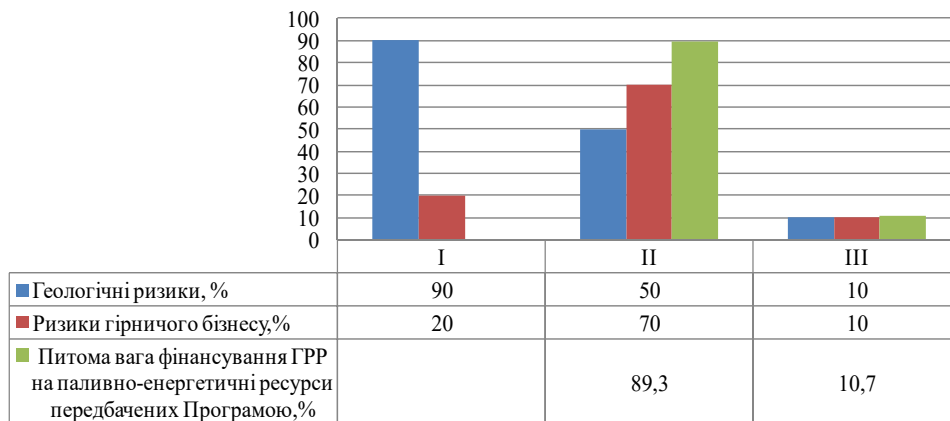


Рис. 3. Співвідношення ризиків гірничого бізнесу із розподілом державного фінансування ГРР на паливно-енергетичні ресурси за Програмою до 2030 року

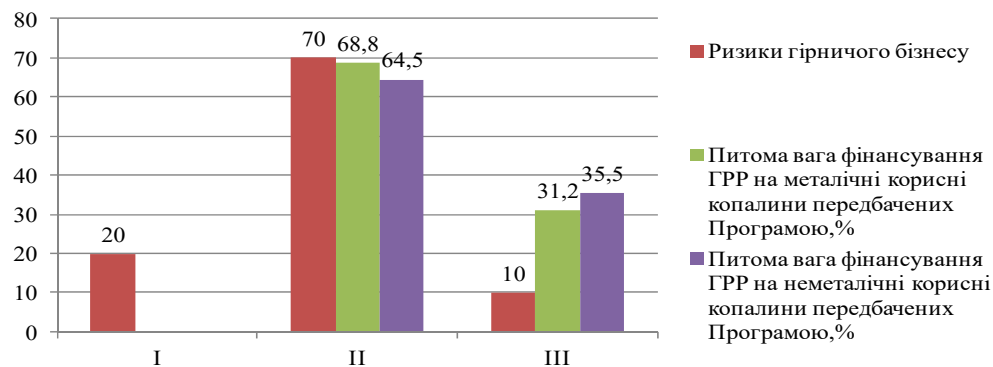


Рис. 4. Співвідношення ризиків гірничого бізнесу із розподілом державного фінансування ГРР а металічні і неметалічні корисні копалини за Програмою до 2030 року

Таблиця 4

Структурний аналіз Загальнодержавної програми розвитку МСБ до 2030 року та Проекту змін – стадійний аспект

№ п/п	Показники	Чинна Програма розвитку МСБ до 2030 року		Проект змін Програми розвитку МСБ до 2030 року	
		млн грн	Питома вага, %	млн грн	Питома вага, %
	Загальний обсяг фінансування, у т. ч.:	189083,74	100	85975,06	100
	- недержавне фінансування	162934,87	86,2	69851,5	81,2
	- державне фінансування, у т. ч.:	26148,87	13,8	16123,56	18,8
1	Паливно-енергетичні ресурси	16397,2	62,7	7685,08	47,7
2	Металічні корисні копалини	1940,45	7,4	902,82	5,6
3	Неметалічні корисні копалини	606,11	2,3	612,33	3,8
4	Гідрогеологічні, інженерно-геологічні та еколого-геологічні роботи	4999,43	19,1	2703,04	16,8
5	Регіональні дослідження території України, спрямовані на розбудову мінерально-сировинної бази			1855,16	11,5
6	Науково-методичне та інформаційне забезпечення виконання програми	2205,68	8,5	947,17	5,9
7	Технічне переоснащення	-	-	1417,96	8,7

*складено за даними (Змінити на Закон України..., 2011; Повідомлення про оприлюднення проекту Закону України..., 2017)

У результаті аналізу структури приросту запасів у межах чинної Програми розвитку МСБ було виявлено, що такий приріст повинен був бути забезпечений на 70,4 %

за рахунок металічних корисних копалин, на 18,0 % за рахунок неметалічних корисних копалин та на 11,6 %

за рахунок паливно-енергетичних ресурсів. Через відсутність реальних проявів і родовищ деяких видів корисних копалин у Програмі було скорегований та актуалізований приріст запасів за групами корисних копалин, що вплинуло на структуру приросту: 80,4 % неметалічні корисні копалини, 10,9 % металічні корисні копалини, 8,7 % паливно-енергетичні ресурси (табл. 5). Така дельта щодо значного зменшення показника приросту паливно-енергетичних ресурсів пов'язана з високими геологічними ризиками та ризиками гірничого бізнесу

щодо отримання очікуваної та достовірної геологічної інформації в рамках виконання ГРР на паливно-енергетичні ресурси. Проектом змін Програми розвитку МСБ було передбачено інфляційні процеси, що спричинило збільшення середніх витрат на одиницю умовного приросту запасів з 4,5 млн грн до 11,1 млн грн, за рахунок збільшення середніх витрат на одиницю умовного приросту на паливно-енергетичні ресурси з 3,6 млн грн до 11,7 млн грн та металічних корисних копалин з 0,1 млн грн до 1,1 млн грн.

Таблиця 5

Структура приросту запасів корисних копалин у рамках завдань
Загальнодержавної програми розвитку МСБ України до 2030 року

№ п/п	Показники	Чинна Програма розвитку МСБ до 2030 року			Проект змін Програми розвитку МСБ до 2030 року		
		Одиниці умовного приросту (од. у.п.)	Питома вага, %	Середні витрати на од. у.п., млн грн	Одиниці умовного приросту (од. у.п.)	Питома вага, %	Середні витрати на од. у.п., млн грн
	Приріст/оцінка запасів за рахунок, у т. ч.:	42080,81	100	4,5	7712,55	100	11,1
	- недержавне фінансування	2595,41	6,2	62,8	184,9	2,4	377,8
	- державне фінансування, у т. ч.:	39485,4	93,8	0,7	7527,65	97,6	2,1
1	Паливно-енергетичні ресурси	4584,2	11,6	3,6	658,1	8,7	11,7
2	Металічні корисні копалини	27805,90	70,4	0,1	819,62	10,9	1,1
3	Неметалічні корисні копалини	7095,3	18	0,1	6049,93	80,4	0,1

*складено за даними (Загальнодержавна програма розвитку..., 2011; Повідомлення про оприлюднення проекту Закону України..., 2017)

Висновки. Регіональні геологічні, геофізичні та геологознімальні роботи (I стадія ГРР) у розвинутих країнах здебільшого виконуються державними інституціями та фінансуються з державного та федеральних бюджетів. Пошукові і пошуково-оцінювальні роботи (II етап ГРР) у таких країнах, як правило, мають комерційне фінансування, оскільки спрямовані на відкриття та економічну оцінку родовищ корисних копалин. Розвідувальні роботи (III стадія ГРР) виконуються та фінансуються бізнесом і лише для об'єктів, рентабельність яких доведено. В Україні ситуація дещо відмінна від описаної вище. На сьогодні державні інституції в Україні забезпечують виконання всіх трьох стадій геологорозвідувальних робіт від регіонального геологічного вивчення територій, пошуку та пошукової оцінки родовищ корисних копалин, до розвідки родовищ корисних копалин. Слід зауважити, що державне фінансування на виконання таких робіт припадає виключно на державні інституції, що належать до сфери управління Державної служби геології та надр України в рамках виконання Загальнодержавної програми розвитку МСБ до 2030 року. Для вибору джерела фінансування, відповідно до стадій ГРР, необхідно зважувати на комплекс ризиків, у т. ч. на такі, як геологічні та загальні ризики гірничого бізнесу. Чинна Програма розвитку МСБ до 2030 року забезпечує фінансування державним коштом I стадії ГРР на 9,91 % від загальних витрат за Програмою, II стадії, яка вважається найбільш ризикованою, на 65,71 % та III стадії ГРР, що вважається найбільш капіталомісткою, на 16,7 %. Певні кроки щодо оптимізації даної Програми були зроблені в частині актуалізації об'єктів ГРР шляхом відбракування непідтверджених проявів і родовищ деяких корисних копалин, що вплинуло на зниження запланованого показника умовного приросту запасів корисних копалин. Також було виключено з напрямів державного фінансування роботи з розвідки (III стадія ГРР) та зосереджено таке фінансування на пошукових та пошуково-оцінювальних роботах (II стадія ГРР) з метою виявлення інвестиційно привабливих об'єктів для подальшої їх аукціонної реалізації.

Нові геополітичні виклики зумовили потребу в уточненні робіт, спрямованих на розвиток МСБ. Але всі зміни повинні приводити до прозорості в галузі, особливо якщо йдеться про її державне фінансування. На жаль, проект змін передбачає виключення з програми додатка 3, який давав змогу аналізу переліку робіт щодо розвитку МСБ у розрізі груп корисних копалин та стадій ГРР.

Список використаних джерел

- Державні закупівлі замовника Державна служба геології та надр. (н.д.). Отримано 16 жовтня 2018, із <https://zakupki.prom.ua/gov/company0eaa96d6b6344df0bf574a6cef5c8e22?p=2>
- Жикаляк, М.В. (2013). Світовий досвід державного регулювання гірничої промисловості. *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво*, 4, 69–74
- Закон України "Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року" (2011). Отримано 12 січня 2019, із <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/3268-17>
- Михайлов, В.А. (Ред.). (2006). *Основи економічної геології*. Київ: Логос.
- Наказ Комітету України з питань геології та використання надр про затвердження Положення про стадії геологорозвідувальних робіт на тверді корисні копалини. (2000). Отримано 02 січня 2019, із <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0124-00>
- Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України про затвердження Положення про стадії геологорозвідувальних робіт на підземні води (гідрогеологічні роботи). (2001). Отримано 02 січня 2019, із <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0648-01>
- Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України про затвердження Правил розробки нафтових і газових родовищ. (2017). Отримано 02 січня, 2019, із http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE30560.html
- Повідомлення про оприлюднення проекту Закону України "Про внесення змін до Закону України "Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року". (2017). Отримано 05 лютого 2019, з <http://www.geo.gov.ua/notice-of-promulgation-of-draft-regulatory-acts/>
- Постанова Кабінету Міністрів України про затвердження Порядку використання коштів, передбачених у державному бюджеті для розвитку мінерально-сировинної бази та внесення змін до Порядку проведення геологорозвідувальних робіт за рахунок коштів державного бюджету. (2011). Отримано 16 жовтня 2018, із <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/301-2011-%D0%BF>

References

- Government Procurement of the State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine. (n.d.). Retrieved October 16, 2018, from <https://zakupki.prom.ua/gov/company0eaa96d6b6344df0bf574a6cef5c8e22?p=2> [In Ukrainian]
- Mikhailov, V. (Eds). (2006). *Fundamentals of Economic Geology*. Kyiv: Logos. [In Ukrainian]

Notice of the promulgation of the draft Law of Ukraine "On Amendments to the Law of Ukraine" On Approval of the National Program for the Development of the Ukrainian Mineral Resources Base for the Period until 2030". (2017). Retrieved January 5, 2019, from <http://www.geo.gov.ua/notice-of-promulgation-of-draft-regulatory-acts/> [In Ukrainian]

Regulations on the stage of exploration works on groundwater (hydrogeological works). (2001). Retrieved January 2, 2019, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0648-01>. [In Ukrainian]

Regulations on the stage of exploration works on solid minerals. (2000). Retrieved January 2, 2019, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0124-00> [In Ukrainian]

Rules for the development of oil and gas fields. (2017). Retrieved January 2, 2019, from http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE30560.html. [In Ukrainian]

The National program of development of mineral base of Ukraine for period to 2030. (2011). Retrieved January 12, 2019, from <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/3458-15> [In Ukrainian]

The procedure for using state funds for the development of the mineral base and amending the Procedure for carrying out exploration works at the expense of the state budget. (2011). Retrieved October 16, from <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/301-2011-%D0%BF> [In Ukrainian]

Zhykalyak, M. (2013). World experience of government regulation of mining industry. *State and regions. Series: Economy and Entrepreneurship*, 4, 69-74. [In Ukrainian]

Надійшла до редколегії 04.12.18

A. Balega, PhD student,
E-mail: a_balega@ukr.net
M. Kurylo, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: kurilo@mail.univ.kiev.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasilivska Str., Kiev, 03022, Ukraine

OPTIMIZATION GEOLOGICAL STUDIES STAGES FINANCING IN DOMESTIC PRACTICE

The system of organization and financing of geological exploration works was investigated in separate stages. A comparison of the stages and their financial support in Ukraine and abroad has been carried out. In general, the stages correspond to the schemes recommended by the United Nations (UN) as international, but have their own specificity in terms of prospecting and general exploration. The objects, subjects and main sources of financing of works in accordance with the stages of the geological exploration works were defined.

The level of state and non-state expenditures in the development of mineral base of Ukraine is fixed by the National program of development of mineral base of Ukraine by 2030; it is 13.8 % and 86.2 % respectively.

The structure of public expenditures within the stages of the geological exploration works was investigated.

The National program of development of mineral base of Ukraine by 2030 does not directly reflect the financing of the of geological exploration works by stages. According to the results of the sample, which is reflected and systematized, it is determined that the state budget provides the work of all three stages from the geological study of the territory to the exploration works. Geological exploration works funded by state funds in Ukraine are executed exclusively by state enterprises.

Comparison of the financing indicators of the Program up to 2030 with the distribution of the main geological risks and general risks of mining business was conducted. At the first stage of the geological exploration works, high geological risks are accompanied by moderate mining risks and insignificant specific costs for obtaining geological information; public funding for these activities is concentrated at 9.91 % of the total funding. Stage II of the geological exploration works is accompanied by a higher than average indicator of geological risk, high risk of mining business and significant costs, with 65.71 % of government funding concentrated on these activities. The lowest geological risks and risks of mining business are inherent in Stage III of the geological exploration works, which is the most capital intensive, and whose financing is concentrated 16.7 % of state funding.

The geopolitical challenges have led to the need for clarification of the work in the National program of development of mineral base of Ukraine by 2030. There were: actualization of the objects of the geological exploration works, the exclusion from the state financing of the detail exploration (stage III of the geological exploration works) and the concentration of such funding in prospecting and general exploration (stage II of the geological exploration works) in order to identify investment-attractive objects for their further auctioning.

Keywords: stages of geological exploration, geological risks, mining business risks, minerals, state financing, stock growth.

A. Балег, асп.,
E-mail: a_balega@ukr.net
М. Курило, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: kurilo@mail.univ.kiev.ua
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ ФИНАНСИРОВАНИЯ СТАДИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ НЕДР В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ

Проанализирована система организации и финансирования геологоразведочных работ (ГРП) по отдельным стадиям. Проведено сопоставление стадий и их финансового обеспечения в Украине и за рубежом. Установлено, что в целом стадийность соответствует схемам, рекомендованным ООН как международные, но имеет свою специфику в части поисковых и поисково-оценочных работ. Определены объекты, субъекты и основные источники финансирования работ в соответствии со стадиями ГРП.

Определено, что уровень государственных и негосударственных расходов в рамках развития минерально-сырьевой базы на законодательном уровне закреплён Общегосударственной программой развития минерально-сырьевой базы до 2030 года, он составляет 13,8 % и 86,2 % соответственно.

Исследована структура государственных расходов в пределах стадий ГРП. Общегосударственная программа развития МСБ до 2030 года прямо не отражает финансирования ГРП по стадиям. По результатам систематизированной выборки, определено, что государственными средствами обеспечены работы всех 3 стадий от геологического изучения территории до разведочных работ. Государственное финансирование на выполнение ГРП приходится исключительно на государственные институты, которые принадлежат к сфере управления Держгеонедр, хотя в соответствии с действующим законодательством, исполнителями ГРП по этой программе являются специализированные предприятия всех форм собственности.

С целью выявления оптимального распределения финансирования ГРП по стадиям проведено сопоставление показателей финансирования по Программе до 2030 года с распределением основных геологических рисков и общих рисков горного бизнеса. Так, на I стадии ГРП достаточно высокие геологические риски сопровождаются умеренными рисками горного бизнеса и незначительными удельными затратами для получения геологической информации, при этом государственных средств в рамках Программы развития МСБ до 2030 года на этих работах сосредоточено 9,91 % общего объема финансирования. II стадия ГРП сопровождается выше среднего уровня геологическими рисками, высоким риском горного бизнеса и значительными затратами на эти работы, которые составляют 65,71 % государственного финансирования. Самые низкие геологические риски и риски горного бизнеса присущи III стадии ГРП, которая является наиболее капиталоемкой, и на финансировании которой сосредоточено 16,7 % государственных средств. Данный анализ позволяет сделать вывод, что государственными средствами обеспечено финансирование наиболее рискованной стадии ГРП, что в результате может привести к неполучению ожидаемого качественного геологического продукта.

Установлено, что геополитические вызовы обусловили потребность в уточнении работ в Программе развития МСБ до 2030 года в части актуализации объектов ГРП, исключение из направлений государственного финансирования работ по разведке (III стадия ГРП) и сосредоточение такого финансирования на поисковых и поисково-оценочных работах (II стадия ГРП) с целью выявления инвестиционно привлекательных объектов для последующей их аукционной реализации. Проект изменений предусматривает исключение из Программы развития МСБ приложения 3, которое позволяет провести анализ перечня работ по развитию МСБ в разрезе групп полезных ископаемых и стадий ГРП.

Ключевые слова: стадии геологоразведочных работ, геологические риски, риски горного бизнеса, полезные ископаемые, государственное финансирование, прирост запасов.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 556.506+620.92+620.987

О. Ободовський, д-р геогр. наук, проф.,
E-mail: obodovskiy58@gmail.comВ. Онищук, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
E-mail: willy38@ukr.netО. Почасвець, асп., пров. інж.,
E-mail: po4aevets@gmail.comКиївський національний університет імені Тараса Шевченка,
пр. акад. Глушкова, 2, м. Київ, МСП-680, УкраїнаПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ
НА РІЧКАХ БАСЕЙНУ ДНІПРА (НА ПРИКЛАДІ р. РОСЬ)

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

Викладено новий науково-технологічний підхід щодо експлуатації гідроенергетичного потенціалу річок у басейні Дніпра. Наведено конструктивні й компоновальні рішення для задекларованих високоекологічних малих гідроелектростанцій. Наведено приклади гідравлічного розрахунку напірної деривації та визначається потужність гідроелектростанцій з урахуванням дії додаткового електромагнітного поля на її окремих робочих органах. Як пілотну річку використано р. Рось, для якої показані місця розташування універсальних високоекологічних малих ГЕС та визначено їх основні робочі характеристики. Крім того, надано рекомендації стосовно раціонального розміщення гідроелектростанцій з урахуванням типу русла. Науковою новизною нового технологічного підходу є використання додаткового місцевого електромагнітного поля у кінцевій частині напірного трубопроводу на ділянці завдовжки не менше 10 м, на форсунці і на турбіні. Наявність електромагнітного поля навколо турбіни і генератора дає можливість працювати станції при значних їх обертах (від 600 до 16 тисяч обертів за хвилину). Крім того, на фоні електромагнітного поля, через відсутність тертя в підшипниках, збільшується термін експлуатації турбін і генераторів. Універсальність нових конструкцій гідроелектростанцій пояснюється тим, що такі станції можна використовувати на будь-якому водному об'єкті (гірській чи рівнинній річці, озері, водосховищі або біля наливного басейну). Техніко-економічна ефективність високоекологічних гідроелектростанцій оцінюється високим рівнем збереження екологічної безпеки водного об'єкта, економічністю будівництва та достатньо високим рівнем безпечності роботи під час проходження паводків, що досягається мінімальним втручанням і водокористуванням на об'єкті. Крім того, робота станції є ефективною за мінімальних об'ємів заборів води на будь-якій ділянці річки, майже не порушуючи при цьому гідроекоекологічні параметри водного об'єкта.

Ключові слова: річка, високоекологічна мала гідроелектростанція, гідроморфологічний стан річки, технологічна парадигма використання робочих органів деривації, електромагнітне поле.

Постановка проблеми. З початку ХХ ст. в Україні були побудовані малі ГЕС (МГЕС) на багатьох малих річках. На кінець 1940-х – першу половину 50-х років чисельність малих гідроелектростанцій в Україні становила понад 950 із загальною встановленою потужністю 300 МВт (у 70-ті – понад 1500 малих ГЕС). Однак у зв'язку з розвитком централізованого електропостачання і тенденцією виробництва електроенергії на потужних ТЕС (ТЕЦ), ГЕС та АЕС, будівництво МГЕС у середині 60-х років минулого століття було майже повністю призупинено, а пізніше припинено зовсім. Більшість існуючих малих ГЕС були згодом демонтовані, сотні з них зруйновані (Ободовський та ін., 2016). Натомість мала гідроелектрогенерація набула широкого розвитку у багатьох розвинутих країнах як Європи, так і світу – у Швейцарії відсоток виробництва електроенергії на малих ГЕС становить 8,3 %, в Іспанії – 2,8 %, у Швеції – майже 3 %, а в Австрії – 10 %. Ще більш вражаючих показників вдалося досягти Китаю – близько 18–20 % всієї електроенергії тут виробляють більше 80 тисяч малих ГЕС (Ободовський та ін., 2016; Асарин та Радченко, 2005).

В Україні відновлення малої гідроелектрогенерації розпочалось лише на початку нового тисячоліття. Особливо сприяє даній тенденції впровадження в Україні "зеленого тарифу". Рентабельність генерації і досить швидко окупність проектів (близько 5–7 років) зацікавлює приватних інвесторів. Станом на сьогодні в Україні працює 70 малих гідроелектростанцій загальною потужністю 90 МВт, які виробляють від 275 до 400 млн кВт/год електроенергії на рік (Малі ГЕС України, 2016; Енергетична стратегія України..., 2013). Однак широкого розвитку малої гідроенергетики у нашій країні не відбулось у зв'язку з великим спротивом громадськості. Наприклад, так звана історія намірів будівництва малої ГЕС на Росі біля м. Біла Церква сягає більше десяти років (Екологічна проблема..., 2016).

Слід зауважити, що сучасні технології будівництва малих ГЕС є модернізованими варіантами конструктивних елементів (робочих органів), які об'єднані на старому традиційному технологічному підході щодо використання гідроенергетичного потенціалу річок. Експлуатація таких ГЕС не може кардинально вирішити проблему розвитку малої гідроенергетики, оскільки потужності їх є незначними, а сумарний вплив на русловий режим надзвичайно суттєвий. Відомо, що розвиток великої гідроенергетики потребує значних матеріальних і фінансових затрат, які мають окупність протягом багатьох років з урахуванням реальних незворотних змін навколишнього середовища. Крім того, для їх будівництва і безпечної експлуатації вкрай мало необхідних місць розташування на річках України.

Виходячи з основних положень міжнародних стандартів (Water Quality...EN14614:2004, 2005; Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС..., 2006) технічне використання загального (теоретичного) гідроенергетичного потенціалу не повинно виходити за межі екологічного гідроенергетичного потенціалу (допустимого за умовами збереження природного стану річок). За такого підходу річковий стік буде об'єднано долученим до альтернативних джерел енергетики. У цьому контексті слід зауважити, що погіршення гідробіологічних умов для традиційних ГЕС пов'язане зі значним дискретним відбором річкового стоку (Бабій та ін., 2016).

Мета дослідження. Деталізація технологічної парадигми виробництва електроенергії з використанням додаткового електромагнітного поля на окремих робочих органах деривації гідроелектростанцій і впровадження даної задекларованої розробки у практику гідроенергетичного будівництва.

Методика дослідження. Нами запропонована технологічна парадигма виробництва гідроенергії з мінімальним використанням водних ресурсів на малих за

потужністю ГЕС (Ободовський та Онищук, 2015; Онищук та ін., 2015). Вона полягає у використанні електромагнітного поля на робочих органах напірної деривації. Гідроелектростанція з такою деривацією буде працювати з малими витратами води, що забезпечить майже безперервну її роботу протягом року і при цьому не буде суттєво впливати на гідроекологічний стан річкової системи. ВМГЕС рекомендується будувати на звивинах гірських річок, які мають достатні перепади висот поздовжнього профілю.

Результати і обговорення. Технологічна парадигма розвитку малої гідроенергетики. Переваги малої гідроенергетики за новим технологічним підходом щодо високоекологічного використання водних ресурсів:

- виробництво електроенергії без використання викопного органічного та ядерного палива;
- значний термін служби та висока надійність експлуатації;
- передбачуваність та забезпеченість режимів роботи станції при зміні напруги у мережі споживачів;
- висока маневреність і коефіцієнт готовності станції для підключення до єдиної енергетичної системи;
- можливість повної автоматизації процесу експлуатації;
- мінімальний вплив на навколишнє середовище при оптимальному виборі місця розташування ГЕС та дотримання екологічного законодавства;
- робота ГЕС за новою технологією гідроелектрогенерації майже протягом всього року;
- мінімальний вплив на ландшафт та незначне відчуження земельних ділянок;
- додаткові можливості для ведення рибного господарства, зрошення, водопостачання;
- експлуатація ГЕС за малих витрат води (у межах від 30 до 400 л/с) і її скид поруч із водозабором практично не змінює гідралічний режим на водному об'єкті.

Перспективним напрямом будівництва малих та середніх за потужністю ГЕС є використання електромагнітного поля на окремих елементах деривації (при збереженні сучасних, традиційних за базовою конструкцією, об'єктів гідроенергетики). У цьому контексті пропонуються задекларовані нові конструктивні елементи деривації ГЕС та їх раціональне комплексне розміщення на гірських і рівнинних річках (Ободовський та Онищук, 2015; Онищук та ін., 2015; Онищук та Ободовський, 2017¹; 2017²). Гідроелектростанції з новою конструкцією деривації були науково обґрунтовані і отримали назву – високоекологічні (Асарин та Радченко, 2005; Ободовський та ін., 2016).

Робота високоекологічної малої гідроелектростанції (ВЕМГЕС). Робота ВЕМГЕС характеризується дією додаткового електромагнітного поля на водний потік деривації (підвідний напірний трубопровід і конусна насадка або форсунка з подвійними обкладинками). При циркуляції гелію або аргону між стінками обкладинок формується навколо і всередині трубопроводу додаткове місцеве електромагнітне поле, яке обумовлює у кінцевій частині трубопроводу дію ефекту ежекції, що призводить до прискорення руху водних мас (Ободовський та Онищук, 2015; Онищук та ін., 2015; Онищук та Ободовський, 2017²). Циркуляція гелію або аргону у просторах обкладинок відбувається під впливом перепаду температур між водою у трубопроводі і атмосферним повітрям навколо нього. У результаті тертя молекул газу об стінки обкладинок на їх поверхні індукуються статичні заряди. Електромагнітне поле на указаній ділянці деривації заміщує поле гравітації, що призводить до формування компактного центрального струменя, в якому має

спостерігатись ламінарний режим течії. Таким чином, навколо струменя буде мати місце вакуумний простір. У цей простір має надходити повітря з води і за допомогою зворотного клапану виходити назовні, що забезпечить турбіну від вібрації при значних допустимих швидкостях її обертання. У цьому контексті слід зауважити, що турбіна також має бути занурена в електромагнітне поле, що дасть можливість звести майже до нуля опір води і повітря навколо турбіни і генератора.

Основні конструктивні і компоувальні рішення напірної деривації високоекологічних малих гідроелектростанцій. Ефективність роботи напірної деривації ВМГЕС перш за все залежить від наявності додаткового місцевого електромагнітного поля навколо кінцевої частини завдовжки не менше 10 м напірного трубопроводу. Для цього рекомендується конусну насадку або форсунку і ківшеву турбіну також виконати з подвійними обкладинками (Онищук та Ободовський, 2017¹; 2017²; 2017³). Наявність електромагнітного поля навколо турбіни і генератора дає можливість працювати станції при значних їх оборотах (від 600 до 16 тисяч обертів за хвилину). Крім того, на фоні електромагнітного поля, через відсутність тертя у підшипниках, збільшується термін експлуатації турбін і генераторів (орієнтовно у три рази). ВЕМГЕС рекомендується розміщувати на будь-якій ділянці річки, зокрема на заплаві з боку опуклого берега звивини з показником її розвитку S/L у межах від 1,4 до 1,8 (де S – довжина звивини по тальвегу, L – крок звивини, який визначається між двома переказами) (Чалов, 2008), що відповідає її відносній динамічній рівновазі і найбільшій гідралічній вигідності. Під час проходження катастрофічних паводків як на гірських, так і на рівнинних річках (при значному виході води на заплаву) підвідний (напірний) трубопровід та трубчатий водовідвід мають бути перекриті гідралічними затворами. Будівлю ГЕС бажано розміщувати у заплаві улоговині при положенні ківшевої турбіни на 0,5–1 м вище від поверхні заплави.

При компоуванні ГЕС рекомендується враховувати наявність необхідних об'єктів інфраструктурної забудови території. Важливим аспектом при будівництві ВЕМГЕС є наявність майже незмінної гідроморфологічної стійкості окремих ділянок і самої річки у цілому. Це свідчить про те, що ВМГЕС не будуть порушувати перебіг руслових процесів, а також збережуть природний гідробіологічний стан водного об'єкта. Порівняно з традиційними схемами розміщення малих ГЕС, для нині задекларованих не треба влаштувати греблі та прокласти довгі і великого діаметру напірні трубопроводи. На сьогодні існуючі і запроектовані до будівництва ГЕС суттєво порушують гідроекологічний режим на відповідній ділянці річки і прилеглої до неї території, оскільки вони працюють на відборі великих об'ємів (витрат) води. Крім того, будівництво таких ГЕС потребує значних матеріальних і фінансових витрат. Слід також зауважити, що темпи будівництва традиційних ГЕС пов'язані зі значним громадським спротивом стосовно відведення великих площ землі та корінної перебудови річки.

У подальшому були розроблені покращені конструкції деривації гідроелектростанцій (УВМГЕС) (Онищук та Ободовський, 2017¹; 2017²; 2017³), тобто їх універсалізація. В основу цих розробок була поставлена задача покращення конструктивних елементів деривації, задекларованих УВМГЕС, які змогли б успішно конкурувати з існуючими малими та середніми за потужністю ГЕС у безпечному екологічному режимі їх експлуатації як на гірських, так і на рівнинних річках. Одним із важелів досягнення такої мети є те, що станція (УВМГЕС) містить у собі турбіну на одному валу з генератором електричного

струму. Сама турбіна знаходиться на опорі і має зверху подвійну обкладку. При цьому УВМГЕС має форсунку з подвійною обкладкою, яка розміщена між турбіною та підвідним напірним трубопроводом.

Будівля станції розташована на заплаві біля самого русла або біля схилу долини, чи за дамбою обвалування. Поруч розміщений акумулювний басейн, в який надходить річкова вода через перепускну трубу. За допомогою гідралічного сифона вона подається в урівноважувальну ємність, розміщену на опорах, з якої відбувається заповнення деривації. Рекомендується використати гідралічний сифон з конструкцією, викладеною в патенті України (Онищук та Ободовський, 2017³). Відвід води із кільцевого басейну здійснюється за допомогою скидного трубопроводу в буферну ємність. З цього басейну вода перекачується гідралічним сифоном у достатньо високу ємність, що дає змогу скидною трубою спрямовуватись у річку.

Універсальність даної корисної моделі пояснюється тим, що таку конструкцію деривації можна використати для нових ГЕС на будь-якому водному об'єкті (гірській чи рівнинній річці, озері, водосховищі або біля наливного басейну).

Техніко-економічна ефективність УВМГЕС оцінюється високим рівнем збереження екологічної безпеки водного об'єкта, економічністю будівництва та достатнім рівнем безпечності роботи під час проходження паводків, що досягається мінімальним втручанням і водокористуванням водним об'єктом. Крім того, робота ГЕС є ефективною при мінімальних об'ємах заборів води на будь-якій ділянці річки і майже не порушує при цьому гідроекологічні параметри водного об'єкта. Порівняльний аналіз кошторисної вартості малої ГЕС біля с. Тур'я Поляна (Закарпатська область) і УВМГЕС на основі даної конструкції показав, що можна отримати економію матеріальних і фінансових затрат за строком їх окупності орієнтовно на 40 %. Це досягається за рахунок здешевлення деривації та суттєвим підвищенням виробництва електричного струму (за наявності від 2 до 4 блоків на одній ГЕС) з можливістю його отримання протягом усього року.

Приклади розрахунків основних характеристик напірного трубопроводу за існуючими методами. Вихідними даними для розрахунків є: діаметр напірного трубопроводу $d = 200$ мм; довжина трубопроводу від урівноважувальної ємності до конусної насадки $l = 20$ м (Онищук та Ободовський, 2017³); перепад висот залягання трубопроводу $H = 3,5$ м; напір води на вході трубопроводу $H_1 = 0,35$ м; загальний гідралічний напір води $H_2 = 3,85$ м.

1. Гідралічний розрахунок напірного трубопроводу за рівнянням Бернуллі (Большаков, 1977):

$$H_1 + 0,81 \frac{Q^2}{g d_1^4} = H_2 + 0,81 \frac{Q^2}{g d_2^4} + \sum S_0 Q^2 \ell + \sum \zeta \frac{Q^3}{d^4}, \quad (1)$$

де $H_1 = z + p/\rho g$ – п'єзометричний напір у розрахунковому створі; $S_0 = 8\lambda/g\pi^2 d^5$ – питомий опір трубопроводу; ζ – коефіцієнт місцевого опору (на вході води у трубу обладнану сіткою).

Хід розрахунку: $H_1 = 0,35$ м, $H_2 = 3,85$ м, $S_0 = 8$ і $\zeta_{ex} = 1,5$, витрата води становить $Q = 0,170$ м³/с, $V = 0,170/0,0295 = 5,78$ м/с.

2. Гідралічний розрахунок напірного трубопроводу за формулою Ф.А. Шевелева (Богомолов і Михайлов, 1972):

$$H = A \ell Q^2 k_0, \quad (2)$$

де A – питомий опір трубопроводу (за даними (Богомолов і Михайлов, 1972)); k_0 – перехідний коефіцієнт, який для квадратичної області опору дорівнює 1.

Згідно з формулою (2) витрата води у напірному трубопроводі дорівнює $Q = [3,85/(6,96 \times 20)]^{0,5} = 0,166$ м³/с, $V = 0,166/0,0295 = 5,63$ м/с.

За наявності електромагнітного поля в кінці трубопроводу, яке за своїм потенціалом вище потенціалу сили гравітації, відбувається заміщення останнього. На фоні відсутності сили гравітації створюються умови для прискорення потоку води у напірному трубопроводі на величину прискорення сили земного тяжіння (при циркуляції газу гелію в обкладках) $V_{n,m} = 5,70 \times 9,81 = 56$ м/с. У даному випадку швидкість потоку води в соплі форсунки буде домірною подвоєній величині $V_c = 112$ м/с. При зазначеній швидкості потоку води обертання має становити не менше $V_m = 112/2 \times 3,14 \times 0,3 = 59,45$ об/с (або 3567 об/хв). Отже потужність ГЕС за наявності одного блоку буде домірною $N = V_m t_{e,n} k_m = 59,45 \times 3 \times 1 = 178$ кВт або 356 кВт за наявності двох генераторів на одному валу з турбіною (де $t_{e,n} = 3$ – показник трансформації роботи електромагнітного поля в генерацію струму, k_m – коефіцієнт корисної дії турбіни на фоні прояву електромагнітного поля, який наближений до 1). При початковому напорі води у трубопроводі 10 м, який можна досягти на урівноважувальній ємності при використанні гідралічного сифона з електромагнітним полем, будемо мати такі величини характеристик: $Q = 0,268$ м³/с, $V_{сеп} = 9$ м/с, $V_{n,m} = 88$ м/с, $V_c = 176$ м/с, $V_m = 93$ об/с або 5580 об/хв, $N = 93 \times 3 \times 1 = 279$ кВт або 558 кВт при двох генераторах на одному валу з турбіною. Мінімальна витрата води у напірному трубопроводі при цьому має дорівнювати 0,03 м³/с, що відповідає за розрахунками кількості обертів турбіни рівним $V_m = 635$ об/хв ($N = 30$ кВт або 60 кВт при двох генераторах на одному валу з турбіною). За наявності газу аргону у просторах між стінками обкладинок (Онищук та Ободовський, 2017³) потужність ГЕС одного блоку буде домірною $N = V_m t_{e,n} k_m = 59,45 \times 6 \times 1 = 356$ кВт або 713 кВт за наявності двох генераторів на одному валу з турбіною (де $t_{e,n} = 6$ – показник трансформації роботи електромагнітного поля в генерацію струму, що пов'язаний з подвоєнням енергетичного рівня газу аргону порівняно з гелієм; k_m – коефіцієнт корисної дії турбіни на фоні прояву електромагнітного поля, який наближений до 1). При початковому напорі води у трубопроводі 20 м, який можна досягти на урівноважувальній ємності при використанні гідралічного сифона з електромагнітним полем, будемо мати такі величини характеристик: $Q = 0,379$ м³/с, $V = 12,85$ м/с, $V_{n,m} = 126$ м/с, $V_c = 252$ м/с, $V_m = 133$ об/с або 8000 об/хв, $N = 133 \times 6 \times 1 = 798$ кВт або 1596 кВт при двох генераторах на одному валу з турбіною. Мінімальна витрата води у напірному трубопроводі при цьому має дорівнювати 0,03 м³/с, що відповідає за розрахунками кількості обертів турбіни рівним $V_m = 635$ об/хв ($N = 60$ кВт або 120 кВт при двох генераторах на одному валу з турбіною).

Принципові особливості заміни поля гравітації електромагнітним полем. Заміна сили гравітації відбувається за умови перевищення потенціалу електромагнітного поля над природним силовим потенціалом у конкретному місці. Силу гравітації водного середовища F на ділянці трубопроводу завдовжки можливої її заміни електромагнітним полем можна визначити за формулою

$$F = \rho g W_g, \quad (3)$$

де ρ – густина води, яка дорівнює 1000 кг/м³; g – прискорення сили земного тяжіння, яке домірне 9,81 м/с² або дещо більше над водною поверхнею – 9,84 м/с²; W_g – об'єм води у трубопроводі (у зоні впливу електромагнітного поля на поле гравітації), м³. Силу електромагнітного

поля нами пропонується визначати за емпіричною формулою, яка отримана на основі теореми π , а тому вона потребує, можливо, подальшого уточнення (*Water Quality...EN14614: 2004, 2005*):

$$E = pW_n \frac{V^2}{4\pi r I_3}, \quad (4)$$

де p – тиск газу гелію у подвійній обкладинці конусної насадки або форсунки, який дорівнює 0,18 Па (0,02 ат) або 200 кг/м²; W_n – об'єм простору у подвійній обкладинці елементів деривації, м³; r – віртуально-реальний радіус простору від центру труби до її зовнішньої поверхні; I_3 – загальна довжина елементів деривації з електромагнітним полем, м.

Сила поля гравітації у трубопроводі за довжиною домірною 10 м дії електромагнітного поля від конусної насадки або форсунки дорівнює $F = 310 \text{ кгм/с}^2$ (при $\omega = 0,03 \text{ м}^2$; $W_6 = 0,03 \times 10 = 0,3 \text{ м}^3$).

Сила електромагнітного поля навколо конусної насадки або форсунки і кінцевої частини напірного трубопроводу орієнтовно становить $E = 200(2 \cdot 3,14 \cdot 0,065 \cdot 0,006 \cdot 2,4) \cdot (112^2/4 \cdot 3,14 \cdot 0,096 \cdot 10) = 1228,52 \text{ кгм/с}^2$. Отже сила електромагнітного поля значно перевищує силу гравітації у кінцевій частині деривації.

Рекомендації щодо розміщення високоекологічних малих гідроелектростанцій. Комплексне використання водних ресурсів необхідно проводити з дотриманням умов збереження водних об'єктів на високому екологічному рівні (*Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС... 2006*).

1. Для впровадження в галузь енергетики нами пропонуються нові конструкції деривації ГЕС. Такі конструкції ГЕС будуть працювати з малими витратами води, що забезпечить безперервну їх роботу протягом року. Технологія використання водного ресурсу такими ГЕС ґрунтується на створенні додаткового місцевого потенціалу електромагнітного поля на елементах деривації (*Ободовський та Онищук, 2015; Онищук та ін., 2015; Онищук та Ободовський, 2017¹; 2017²; 2017³*).

2. Високоекологічні малі ГЕС рекомендується будувати на звивинах гірських річок, які мають достатні перепади висот поздовжнього профілю. На високігір'ї такі ГЕС можна розміщувати також на відносно прямих ділянках річки.

3. На ділянках річок, які мають мінімальну витрату з 90%-вою забезпеченістю не менше 0,60 м³/с, влаштування таких ГЕС можливе при заборах води у межах від 0,03 до 0,2 м³/с.

4. На ділянках річок з обвалуванням русло-заплавного комплексу влаштування високоекологічних ГЕС пропонується здійснювати за межами дамб обвалування. Відбір води з русла річки відбувається перепуском трубою у буферний басейн, а далі напірною

деривацією до будівлі ГЕС. Басейн можна використати для вирощування річкових і промислових риб.

5. На ділянках річок з осередковим типом русла (руслова багаторукавність) будівництво нових за конструкцією деривації ГЕС рекомендується провадити за схемою відбору фільтраційної води у заплавних буферних басейнах.

6. При типі русла – заплавна багаторукавність бажано для відбору води використовувати найбільший рукав. При цьому також необхідно мати буферний басейн.

7. На рівнинних ділянках річок, які мають високий рівень зарегульованості стоку, будівництво УВМГЕС рекомендується провадити біля водосховища (у верхньому б'єфі гідровузла) та біля ставків. Ця можливість пояснюється тим, що, як правило, використовується мала витрата води, яка може подаватися на велику висоту гідравлічним сифоном і відповідно напірним трубопроводом при великій середній швидкості потоку на турбіну.

Попередні рекомендації стосовно правил експлуатації високоекологічних малих гідроелектростанцій. Станція має бути повністю автоматизованою і підлягати статусу режимного об'єкта. Центр управління станцією повинен перебувати за межами впливу електромагнітного поля. Радіус зони залежить лінійно від загальної максимальної потужності ГЕС. При потужності станції у 3 МВт радіус зони має бути не менше 10 м і, відповідно, при 9 МВт – 30 м. Межі можливих при експлуатації станції обертів турбіни: оптимальний режим роботи високоекологічної малої ГЕС є $V_m = 8000 \text{ об/хв.}$; максимальна (допустима) – 16000 об/хв; мінімальна – 600 об/хв.

Сучасний стан та перспективи використання водного ресурсу для гідроенергетики на річці Рось. Річка Рось – це правобережна притока Дніпра, яка впадає в нього біля села Хрещатик на висоті 70 м над рівнем моря. Вона належить до 20 найбільших річок України. Річкова мережа басейну р. Рось розвинена добре. Коефіцієнт її густоти з урахуванням річок завдовжки менше 10 км становить 0,38 км/км², без урахування – 0,31 км/км². Басейн р. Рось належить до зони достатньої зволоженості (*Бабій та ін., 2016*). Всього у річку Рось впадає 1136 малих річок, з них завдовжки менше 10 км – 1034.

Нині на Росі працює п'ять ГЕС (табл. 1). Періодичність роботи ГЕС відчутно позначається на екологічному стані Росі (*Бабій та ін., 2016*). Досить потужними малими ГЕС є лише дві: Стеблівська і Корсунь-Шевченківська. Будівництво більшої кількості ГЕС за традиційною технологією є проблематичним, оскільки водність річки не забезпечить необхідного високого екологічного ресурсу для гідроелектрогенерации, а також це може призвести до значного погіршення екологічного стану Росі та річок її басейну.

Таблиця 1

Основні характеристики гідровузлів, розміщених на річці Рось (*Бабій та ін., 2016*)

Назва водосховища (МГЕС)	НПР, м БС	РМО, м БС	Напір, м	Потужність МГЕС, МВт (ГА)*	Призначення
Щербаківське	164,0	162,10	2,50	0,14 (2 по 0,5 і 0,9)	енергетика
Дубинецьке	131,60	131,0	6,80	0,6 (3 по 0,2)	енергетика
Богуславське	127,40	126,60	2,70	1,3 (2 по 0,65)	енергетика, рибне господарство
Стеблівське	113,90	112,75	21,50	2,7 (1,3 і 1,4)	енергетика, водозабезпечення
Корсунь-Шевченківське	99,81	98,80	16,20	1,8 (2 по 0,9)	енергетика
				$\Sigma = 6,54$	

*Кількість гідроагрегатів.

Оцінка використаного гідроенергетичного потенціалу малими УВМГЕС для пілотної річки Рось. На базі запропонованих методичних та технологічних підходів розміщення та конструювання УВМГЕС були запропоновані місця розміщення та визначені потужності цих ГЕС для

р. Рось (рис. 1). Враховуючи також сучасну стратегію розвитку енергетики (*Енергетична стратегія України..., 2013*) запропоновано будівництво нових гідроелектростанцій як на базі існуючих будівель ГЕС (табл. 2), так і у межах прибережної зони водосховищ (табл. 3).

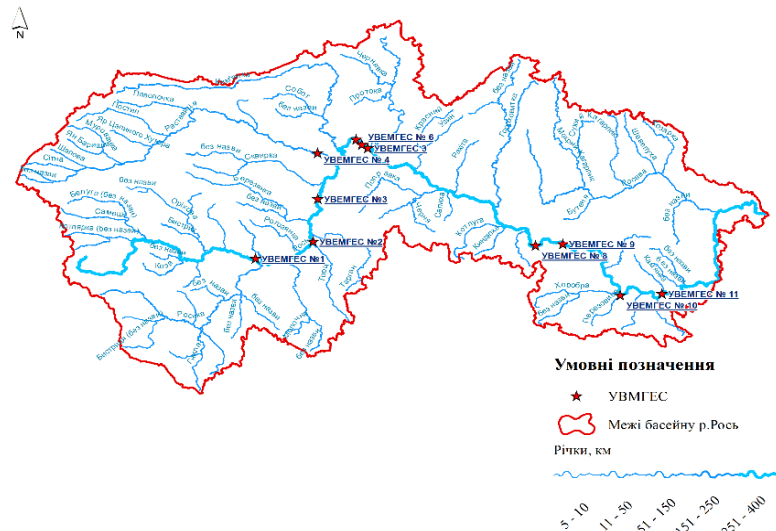


Рис. 1. Карта розміщення нових за технологією використання водних ресурсів високоекологічних малих гідроелектростанцій (УВМГЕС)

Таблиця 2

Основні характеристики високоекологічних малих ГЕС, які рекомендуються для будівництва на базі існуючих гідровузлів, розміщених на річці Рось

Назва гідровузла	Координати існуючої будівлі ГЕС і УВМГЕС	Напір, м	Витрата води при $d_{н.т} = 200 \text{ мм}$ і $\ell = 20 \text{ м}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$V_{\text{сер}}$ ($V_{\text{сop}} = 2 \times 9,81 V_{\text{сер}}$), $\text{м}^3/\text{с}$	Потужність одного блока при двох генераторах, МВт	Загальна потужність УВМГЕС, МВт (ГАБ)*
Щербаківський	П.ш. $49^{\circ}38'28,23''$ С.д. $29^{\circ}56'41,04''$	2,50	0,134	3,73 (73)	0,148	0,30(2*)
Дубинецький	П.ш. $49^{\circ}32'04,05''$ С.д. $30^{\circ}46'30,83''$	6,80	0,216	6,10(120)	0,245	0,48(2)
Богуславський	П.ш. $49^{\circ}32'24,76''$ С.д. $30^{\circ}52'37,63''$	2,70	0,139	3,86 (75)	0,15	0,30(2)
Стеблівський	П.ш. $49^{\circ}24'26,84''$ С.д. $31^{\circ}06'30,16''$	21,50	0,393	10,85(213)	0,43	0,86(2)
Корсунь-Шевченківський	П.ш. $49^{\circ}24'44,34''$ С.д. $31^{\circ}15'59,22''$	16,20	0,341	9,42 (185)	0,38	0,76(2)
						$\Sigma = 2,7 \text{ МВт}$

*/ Кількість гідроагрегатних блоків.

Таблиця 3

Основні характеристики універсальних високоекологічних малих ГЕС, які рекомендуються для будівництва у прибережній зоні існуючих водосховищ на річці Рось

Назва водосховища і УВМГЕС	Координати будівлі (ГЕС)	Напір, м	Витрата води при $d_{н.т} = 200 \text{ мм}$ і $\ell = 20 \text{ м}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$V_{\text{сер}}$ ($V_{\text{сop}} = 2 \times 9,81 V_{\text{сер}}$), $\text{м}^3/\text{с}$	Потужність одного блока при двох генераторах, МВт	Загальна потужність УВМГЕС, МВт, (ГАБ)*
Косівське № 1	П.ш. $49^{\circ}28'26,62''$ С.д. $29^{\circ}43'23,04''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (*)
Володарське №2	П.ш. $49^{\circ}31'32,13''$ С.д. $29^{\circ}56'13,34''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
Щербаківське №3	П.ш. $49^{\circ}38'28,87''$ С.д. $29^{\circ}56'46,57''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
Трушське №4	П.ш. $49^{\circ}45'52,35''$ С.д. $29^{\circ}56'18,84''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
Білоцерківське верхнє № 5	П.ш. $49^{\circ}45'18,18''$ С.д. $30^{\circ}04'56,03''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
Білоцерківське середнє № 6	П.ш. $49^{\circ}47'19,95''$ С.д. $30^{\circ}06'34,45''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
Білоцерківське нижнє № 7	П.ш. $49^{\circ}46'58,64''$ С.д. $30^{\circ}07'38,59''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
Дубинецьке № 8	П.ш. $49^{\circ}32'02,92''$ С.д. $30^{\circ}46'28,61''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
Богуславське № 9	П.ш. $49^{\circ}32'23,55''$ С.д. $30^{\circ}52'36,48''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
Стеблівське № 10	П.ш. $49^{\circ}24'20,52''$ С.д. $31^{\circ}05'54,96''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
Корсунь-Шевченківське №11	П.ш. $49^{\circ}24'44,69''$ С.д. $31^{\circ}15'19,68''$	10	0,268	9(176)	0,7	1,4 (2)
						$\Sigma = 15,4 \text{ МВт}$

*/ Кількість гідроагрегатних блоків.

З даних табл. 3 видно, що найбільш доцільним є будівництво нових за технологією ГЕС на базі будівель Стеблівської і Корсунь-Шевченківської ГЕС, які працюють під великим напором води. Що стосується будівництва

УВМГЕС у прибережній зоні водосховищ (табл. 4), то тут може бути їх значно ширше впровадження залежно від потреби постачання електроенергії.

Таблиця 4

Зіставлення можливого використання енергетичного потенціалу для пілотної річки Рось

Річка	Загальний енергетич. потенціал, кВт	Екологічно обґрунтований енергетичний потенціал, кВт	ТМГП*, кВт	Загальна потужність ГЕС, кВт	Використ. загального енергетичного потенціалу, %	Використ. екологічно обґрунтов. енергопот., %	ТМП, %
Рось	27048	4100	1800	24650	91	600	1369

*ТМГП – технічно можливий гідроенергетичний потенціал.

Отримані дані по потужностях УВМГЕС на річці Рось доцільно порівняти з їхніми екологічними енергетичними потенціалами. З наведеної табл. 4 видно, що використаний енергетичний потенціал є досить вагомим. Для вказаних річок обрана мінімальна кількість місць розташування УВМГЕС. За результатами екологічного моніторингу їх кількість можна значно збільшити.

Висновки. У завершення викладеного вище матеріалу можна сформулювати такі науково-технічні узагальнення. Будівництво УВМГЕС є перспективним напрямом вирішення проблеми гідроенергетики країни. Експлуатація високоекологічних малих ГЕС дозволить вирішити цілий ряд додаткових проблем, а саме: підвищити гідробіологічну якість річкової води (завдяки мінімальному за об'ємом відбору води на роботу ГЕС); отримати дешево за собівартістю електроенергію та відкрити нові робочі місця. Басейнова гідроенергетика за новою технологією дозволить уникати аварійних відключень споживачів та більш ефективно управляти єдиною електроенергетичною системою України.

Список використаних джерел

- Асарин, А.Е., Радченко, В.Г. (2005). Строительство малых ГЭС в КНР. *Гидротехническое строительство*, 4, 44–45.
- Бабій, П.О., Вишеский, В.І., Шевчук, С.А. (2016). Річка Рось та її використання. Київ: Інтерпрес ЛТД.
- Богомолов, А.И., Михайлов, К.А. (1972). Гидравлика. Учебник для вузов. Москва: Стройиздат.
- Большаков, В.А. (Ред.). (1977). Справочник по гидравлике. Киев: Вища школа.
- Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС: основні терміни та їх визначення. (2006). Консорціум компаній RODECOVERSeau–WRc, Київ.
- Екологічна проблема № 1: масове будівництво ГЕС на річках України. (2016). Отримано із <http://pryroda.in.ua/miniges/mala-hes-na-richtsi-ros>.
- Енергетична стратегія України на період до 2030 року. (2013). Отримано із <http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog>.
- Малі ГЕС України. (2016). Отримано із <https://uk.wikipedia.org/wiki/>.
- Ободовський, О.Г., Ободовський, Ю.О., Онишук, В.В. (2016). Технологічна парадигма розвитку малої гідроенергетики на річках Карпатського регіону. *Науковий вісник Чернівецького нац. ун-ту*, 775, 51–60.
- Ободовський, О.Г., Онишук, В.В. (2015). Спосіб розміщення високоекологічної малої ГЕС. *Патент України на корисну модель № 100050 від 10.07.2015*.
- Онишук, В.В., Ободовський, О.Г. (2017¹). Високоекологічна гідроелектростанція. *Патент України на корисну модель № 121730 від 11.12.2017*.
- Онишук, В.В., Ободовський, О.Г. (2017²). Універсальна високоекологічна мала гідроелектростанція (УВМГЕС). *Патент України на корисну модель № 113587 від 10.02.2017*.
- Онишук, В.В., Ободовський, О.Г. (2017³). Універсальний гідравлічний сифон. *Патент України на корисну модель № 115332 від 10.04.2017*.

- Онишук, В.В., Ободовський, О.Г., Нікулін, Д.О., Ободовський Ю.О. (2015). Модернізована високоекологічна мала гідроелектростанція (ГЕС). *Патент України на корисну модель № 103796 від 25.12.2015*.
- Чалов, Р.С. (2008). Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. Москва: Изд-во ЛКИ.
- Water Quality - Guidance Standard for assessing the hydromorphological features of rivers. (2005). EN14614:2004.CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

Reference

- Asaryn, A.E., Radchenko, V.H. (2005). Stroitelstvo malyykh GES v KNR. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 4, 44–45. [in Russian]
- Babii, P.O., Vyshevskiy, V.I., Shevchuk, S.A. (2016). Richka Ros ta yii vykorystannya. Kyiv: "Interpres LTD". [in Ukrainian]
- Bohomolov, A.Y., Mykhailov, K.A. (1972). Hydravlika. Uchebnyk dlia vuzov. Moskva: Stroiizdat. [in Russian]
- Bolshakov, V.A. (Edc.) (1977). Spravochnik po hydravlike. Kyev: Vyshcha shkola. [in Russian]
- Chalov, R.S. (2008). Ruslovedenie: teoriya, heohrafiya, praktika. T. 1. Ruslovyie protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proiavlenniya u usloviya formirovaniya rechnykh rusel. Moskva: Yzd-vo LKY. [in Russian]
- Ekolohichna problema № 1: masove budivnytstvo HES na richkakh Ukrainy. (2016). Retrieved from <http://pryroda.in.ua/miniges/mala-hes-na-richtsi-ros>. [in Ukrainian]
- Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku. (2013). Retrieved from <http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog>. [in Ukrainian]
- Mali HES Ukrainy. (2016). Retrieved from <https://uk.wikipedia.org/wiki/>. [in Ukrainian]
- Obodovskiy, O.H., Obodovskiy, Yu.O., Onyshchuk, V.V. (2016). Tekhnolohichna paradyhma rozvytku maloi hidroenerhetyky na richkakh Karpatskoho rehionu. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho nats. un-tu*, 775, 51–60. [in Ukrainian]
- Obodovskiy, O.H., Onyshchuk, V.V. (2015). Sposib rozmishchennia vysokoekolohichnoi maloi HES. *Patent Ukrainy na korysnu model № 100050 vid 10.07.2015*. [in Ukrainian]
- Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.H. (2017¹). Vysokoekolohichna hidroelektrostantsiia. *Patent Ukrainy na korysnu model № 121730 vid 11.12.2017*. [in Ukrainian]
- Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.H. (2017²). Universalna vysokoekolohichna mala hidroelektrostantsiia (UVMHES). *Patent Ukrainy na korysnu model № 113587 vid 10.02.2017*. [in Ukrainian]
- Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.H. (2017³). Universalni hidravlichnyi syfon. *Patent Ukrainy na korysnu model № 115332 vid 10.04.2017*. [in Ukrainian]
- Onyshchuk, V.V., Obodovskiy, O.H., Nikulin, D.O., Obodovskiy Yu.O. (2015). Modernizovana vysokoekolohichna mala hidroelektrostantsiia (HES). *Patent Ukrainy na korysnu model № 103796 vid 25.12.2015*. [in Ukrainian]
- Vodna Ramkova Dyrektyva YeS 2000/60/leS : osnovni terminy ta yikh vyznachennia (2006). Konsortium kompanii RODECOVERSeau–WRc, Kyiv. [in Ukrainian]
- Water Quality - Guidance Standard for assessing the hydromorphological features of rivers. (2005). EN14614:2004.CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

Надійшла до редколегії 17.10.18

O. Obodovskiy, Dr. Sci. (Geogr.), Prof.,
E-mail: obodovskiy58@gmail.com
V. Onishchuk, Cand. Sci. (Techn.), Senior Researcher,
E-mail: willy38@ukr.net
O. Pochaievets, PhD Student, Leading Engineer,
E-mail: po4aevets@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
2 Glushkova Ave., Kiev, MSP-680, Ukraine

PERSPECTIVES OF THE USAGE OF HYDROPOWER POTENTIAL OF THE RIVERS OF THE DNIPRO RIVER BASIN (ON THE EXAMPLE OF THE ROS RIVER)

A new scientific and technological approach concerning the high level of ecological usage of hydropower potential of rivers in the Dnipro river basin is presented. The constructive and layout solutions for the declared small high-ecological hydroelectric power plants are presented. Examples of hydraulic calculation of pressure derivation are given and the power of a hydroelectric power plant is determined taking into account the effect of

an additional electromagnetic field on its individual working bodies. The Ros is taken as the pilot river, which shows the locations of universal small high-ecological hydroelectric power stations and their main operating characteristics. In addition, recommendations are made regarding the rational allocation of hydroelectric power plants, taking into account the type of channel. The scientific novelty of the new technological approach is the use of an additional local electromagnetic field at the end of the pressure pipeline at a section length of at least 10 m, on the nozzle and on the turbine. The presence of an electromagnetic field around the turbine and generator enables the stations to operate at significant speeds (from 600 to 16 thousand revolutions per minute). In addition, in the background of the electromagnetic field, due to the absence of friction in the bearings, the life of turbines and generators increases. The universality of new hydroelectric power plants is explained by the fact that such stations can be used on any water facility (mountain or plain river, lake, reservoir or near the reservoir). The technical and economic efficiency of high-ecological hydroelectric power plants is assessed by the high level of environmental safety of the water object, the cost-effectiveness of construction and the achieved level of safety during flood passage, which is achieved by minimal interference and water use of the water object. In addition, the work of the station is effective at the minimum volume of water drain on any part of the river, almost without violating the hydroecological parameters of the water object. Comparative analysis of the estimated cost of a small hydroelectric power station near the village is presented.

Keywords: river, high-ecological small hydroelectric power station, hydromorphological state of the river, technological paradigm of the use of working parts of derivation, electromagnetic field.

А. Ободовский, д-р геогр. наук, проф.,

E-mail: obodovskiy58@gmail.com

В. Онищук, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

E-mail: willy38@ukr.net

Е. Почаевец, асп., вед. инж.,

E-mail: po4aevets@gmail.com

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка,

Пр. акад. Глушкова, 2, г. Киев, МСП-680, Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА РЕКАХ БАСЕЙНА ДНЕПРА (НА ПРИМЕРЕ р. РОСЬ)

Изложен новый научно-технологический подход относительно экологического использования гидроэнергетического потенциала рек в бассейне р. Днепр. Приведены конструктивные и компоновочные решения для задекларированных высокоэкологических малых гидроэлектростанций. Приведены примеры гидравлического расчета напорной деривации, определяется мощность гидроэлектростанции с учетом действия дополнительного электромагнитного поля на ее отдельных рабочих органах. В качестве пилотной реки использована р. Рось, для которой показаны места расположения универсальных высокоэкологических малых ГЭС и определены их основные характеристики. Кроме того, даны рекомендации по рациональному размещению гидроэлектростанций с учетом типа русла. Научной новизной нового технологического подхода является использование дополнительного местного электромагнитного поля в конечной части напорного трубопровода на участке длиной не менее 10 м, на форсунке и на турбине. Наличие электромагнитного поля вокруг турбины и генератора дает возможность работать станции при значительных их оборотах (от 600 до 16000 оборотов в минуту). Кроме того, на фоне электромагнитного поля, из-за отсутствия трения в подшипниках, увеличивается срок эксплуатации турбин и генераторов. Универсальность новых конструкций гидроэлектростанций объясняется тем, что такие станции можно использовать на любом водном объекте (горной или равнинной реке, озере, водохранилище или у наливного бассейна). Техничко-экономическая эффективность высокоэкологических гидроэлектростанций оценивается высоким уровнем экологической безопасности водного объекта, экономичностью строительства и достаточным уровнем безопасности работы во время прохождения паводков, что достигается минимальным вмешательством и водопользованием объекта. Кроме того, работа станции является эффективной при минимальных объемах заборов воды на любом участке реки, почти не нарушая при этом гидроэкологические параметры водного объекта.

Ключевые слова: река, высокоэкологическая малая гидроэлектростанция, гидроморфологическое состояние реки, технологическая парадигма использования рабочих органов деривации, электромагнитное поле.

УДК 504.3.054:(631.11+65.011.55)(477.64)

Є. Наседкін, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.,

E-mail: nasedevg@ukr.net,

Г. Іванова, канд. геол. наук, наук. співроб.,

E-mail: a_1207@ukr.net,

С. Стадніченко, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.,

E-mail: stadnik_sm@ukr.net

Інститут геологічних наук НАН України,

вул. О. Гончара, 55-б, м. Київ, 01054, Україна

О. Андрєєв, канд. геол.-мінералог. наук, старш. наук. співроб.,

E-mail: andreev@univ.kiev.ua

В. Морозенко, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.,

E-mail: vmorozenko@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна

ЩОДО АНТРОПОГЕННОЇ СКЛАДОВОЇ РЕЧОВИНИ АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ м. ЗАПОРІЖЖЯ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук О.І. Меньшовим)

Присвячено дослідженням впливу техногенних процесів на навколишнє середовище, зокрема, визначенню внеску речовини, що утворилась у процесі господарської діяльності, у загальний склад твердої компоненти атмосферного аерозолі. Фактичний матеріал було отримано на основі системного моніторингу приземних повітряних потоків у межах такого потужного індустріального осередку, як м. Запоріжжя. Вибір накопичених на фільтрувальній тканині проб завислої атмосферної речовини проводився щомісячно протягом двох років. Паралельні безперервні спостереження за гідрометеорологічними факторами (швидкості, напрямки, тривалість вітрів, кількість опадів) забезпечили комплексний підхід до опрацювання та узагальнення результатів досліджень. Натурні спостереження та лабораторні дослідження визначили ряд закономірностей розподілу седиментаційної речовини у повітрі, взаємозв'язків її антропогенної і природної складових. У публікації розглянуто особливості хімічного складу та морфології уламкових частинок, надходження яких у повітря зумовили техногенні процеси, а також конденсаційної складової еолової зависі, походження якої пов'язане з високотемпературними процесами. Досліджено зміни у співвідношенні природна / антропогенна частка у речовинному складі аерозолі під впливом зовнішніх природних та антропогенних факторів. Це позначається, між іншим, перерозподілом кількісних співвідношень між конденсованою та дисперговою складовими еолової зависі. При цьому уламкова складова може сягати алевритової розмірності, вміст заліза перевищувати 90 %, а частка домішок ряду чорних та важких металів, зокрема титану, марганцю, нікелю, міді, свинцю, цинку, сягати 40 % і більше. Важкі метали також зустрічаються у вигляді окремих уламкових та конденсаційних утворень, де їх вміст коливається у діапазоні 50–70 %. Аналіз конденсаційної складової у пробах аерозолі за період досліджень дозволив надати їй загальну характеристику та провести попередню класифікацію за хімічним складом. Також окреслено можливість визначення осередків забруднення атмосферного середовища за формою, хімічним складом та розміром аерозолів, сезонними факторами та характеристиками атмосферних потоків. Дослідження засвідчили доцільність уточнення параметрів чинних нормативів системи екологічного контролю якості повітря з урахуванням низки виявлених закономірностей. Окреслюючи перспективу подальших досліджень, зазначено необхідність комплексного підходу до визначення кількісних та якісних показників антропогенної компоненти атмосферного аерозолі в повітрі Запоріжжя, що сприятиме результативності наукового пошуку.

Ключові слова: атмосферний аерозоль, моніторинг, важкі метали.

Постановка проблеми. Одним з актуальних питань у сфері досліджень особливостей впливу техногенних процесів на компоненти навколишнього середовища є визначення внеску речовини, що утворилась у процесі господарської діяльності, у загальний склад твердої компоненти атмосферного аерозолі. Суттєве значення таким дослідженням додають місце та умови їх проведення, зокрема, якщо вони тривають у межах потужних урбанізованих чи індустріальних осередків, де проблема істотного забруднення повітря промисловими викидами загострюється високою щільністю населення.

Як відомо, головними стаціонарними антропогенними джерелами викидів у атмосферу є об'єкти теплоенергетики та металургії, хімічні, нафтопереробні й машинобудівні підприємства, збагачувальні фабрики та кар'єри. Зважаючи на широкий спектр технологічних процесів, які призводять до утворення аерозольної речовини, вивчення цього об'єкта має охоплювати його хімічний склад і просторово-часовий розподіл, вміст мінеральних компонентів, їх морфологію та гранулометричний склад тощо. Актуальними також є дослідження зв'язку якісних та кількісних характеристик повітряної зависі з гідрометеорологічними факторами – інтенсивністю вітрів, їх напрямками, опадами, фенологічними явищами.

Аналіз попередніх досліджень. Загалом, науковому пошуку за різними аспектами окресленої проблеми приділяється значна увага у світі, про що свідчить суттєва кількість публікацій у вітчизняних та закордонних літературних джерелах (Меньшов, 2014; Bondar et al.,

2017; Shu et al., 2001; Zhou et al., 2014). Слід також зазначити, що спектр методів вивчення речовини атмосферних потоків постійно збільшується, сьогодні у світі і в Україні інтенсивно розвиваються експресні та ефективні геофізичні методи досліджень як конденсованої, так і диспергової складових аерозолів. Зокрема, показники магнітної сприйнятливості та її частотної залежності (χ, χ_{rel}) вважаються важливими індикаторами рівня накопичення в еоловій складовій техногенної речовини, у т. ч. продуктів високотемпературних процесів металургійних виробництв.

Аналіз літератури вказує також на те, що одним із сучасних актуальних напрямів досліджень є вивчення дрібнодисперсної складової еолової зависі, що зумовлено рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я. Як відомо, фіброгенна дія атмосферної зависі на організм людини визначається не тільки концентрацією пилу в повітрі, але й гранулометричним складом завислих частинок. Науково доведено тісне кількісне співвідношення між впливом високих концентрацій еолової зависі розмірністю менше 10 мікрон у приземному повітрі житлової забудови і підвищенням смертності та захворюваності населення. Хронічний вплив цих часток, що мають здатність надходити через легеневі мембрани і вносити токсичні речовини безпосередньо у кровоносну систему, визначає розвиток серцево-судинних і респіраторних захворювань, а також хронічної обструктивної хвороби та раку легенів. Відповідно, у світовій практиці ступінь забруднення повітря зваженими частками вимі-

рюється по двох індикаторах – PM10 та PM2,5, що визначаються як середня за певний проміжок часу масова концентрація (мкг/м³) часток з діаметром до 10 мікрметрів (PM10) та, відповідно, 2,5 мкм (PM2,5).

На сьогодні у нашій державі існує усталена система контролю за забрудненням повітря, що включає дослідження відповідності стандартам якості повітря, визначення негативного впливу забруднення атмосфери на здоров'я населення і навколишнє середовище та відповідні прогностичні оцінки. Державною гідрометеорологічною службою здійснюються спостереження за забрудненням атмосферного повітря у більш ніж півсотні міст України на стаціонарних та маршрутних постах та станціях. Державна екологічна інспекція здійснює також вибіркового відбір проб у межах джерел викидів. Санітарно-епідеміологічна служба проводить спостереження за якістю атмосферного повітря у житловій та рекреаційній зонах, поблизу основних доріг та санітарно-захисних зон. Результати натурних спостережень атмосферного повітря включають суттєвий масив інформації, що дозволяє оцінити рівні та ступінь небезпечності забруднення для довкілля та здоров'я населення.

Моніторинг процесів пересування та акумуляції повітряної зависі є важливою ланкою робіт, що проводяться Інститутом геологічних наук НАН України у рамках реалізації проекту з проведення багаторічних безперервних натурних спостережень за якісними та кількісними показниками седиментаційної речовини у складі атмосферних та водних потоків у межах м. Запоріжжя. Комплекс аналітичних досліджень, що на технічно досяжному рівні відображає особливості взаємозв'язків компонентів досліджуваного середовища, включає щомісячні спостереження за кількісними змінами у складі річкової зависі та атмосферного аерозолі, проведення мінералогічного та гранулометричного аналізу сухих проб ґрунтів суходолу, донних відкладів, річкової зависі та атмосферного аерозолі (Митропольський та ін., 2016). Такі спостереження, порівняно зі складовими державної системи контролю якості повітря, дозволяють отримувати на постійній основі зразки атмосферної речовини у кількостях, достатніх для низки додаткових досліджень, зокрема на електронному мікроскопі, седиментографі, енергодисперсійному спектрометрі. Комплексність досліджень, у свою чергу, дозволяє

аналізувати зміни якісних та кількісних характеристик еолової зависі залежно від ряду додаткових факторів.

На сьогодні отримані результати натурних спостережень та лабораторних досліджень за майже дворічний період наповнюють базу даних відповідними інформаційними рядами, також проведено попередню статистичну обробку інформації. Аналіз накопичених матеріалів, між іншим, дав можливість попередньо визначити ряд закономірностей розподілу седиментаційної речовини у складі атмосферних потоків, взаємозв'язку її антропогенної і природної складових, їх морфологію та хімічний склад.

Матеріали і методи досліджень. Система моніторингу стану завислої атмосферної речовини представлена пасткою для відбору атмосферного аерозолі ("вітрило" з двома шарами фільтру), щомісячне вилучення речовини з якої дає можливість вивчати процеси розподілу частинок у приземному атмосферному середовищі за певні проміжки часу протягом року. Цей тип устаткування, апробований протягом тривалої експлуатації в умовах морського узбережжя, зарекомендував себе надійним інструментом відбору натурної речовини з атмосферних потоків (рис. 1) (Наседкін, 2017). Вилучення зразків із пасток раз на місяць створює умови "накопичення" аерозолі за певний час. Паралельні безперервні спостереження за гідрометеорологічними факторами (швидкості, напрямки, тривалість вітрів, опади) забезпечують системний підхід до накопичення, збереження та опрацювання результатів комплексних спостережень, їх подальшого наукового аналізу і узагальнень.

Лабораторні дослідження отриманого натурального матеріалу включають визначення в ньому низки мікроелементів рентген-флуоресцентним методом (лабораторія ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка), дослідження хімічного макро- і мікрокомпонентного складу за допомогою енергодисперсійного спектрометра на базі скануючого електронного мікроскопа, аналіз гранулометричного складу проб (лабораторія фізичних методів досліджень Інституту геологічних наук НАН України). Визначений комплекс лабораторних досліджень дає можливість відокремити і дослідити перебіг седиментаційних процесів за певні часові проміжки, що зумовлюються різними зовнішніми факторами впливу, а також визначити якісні та кількісні характеристики осадової речовини.

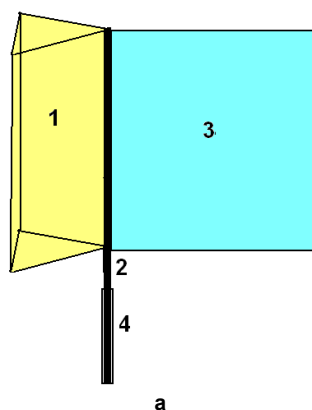


Рис. 1. Пастка для відбору атмосферного аерозолі:

а) схема конструкції пастки для атмосферного аерозолі: 1) робоча частина пастки – каркас-трикутник, обтягнутий двома шарами фільтрувальної сітки різної щільності, 2) штанга, що вільно обертається на осі, 3) флюгер-стабілізатор, що утримує пастку проти вітру, 4) станина-кріплення; б) пастка для відбору атмосферного аерозолі на причалі Державної установи "Науковий гідрофізичний центр НАН України", м. Запоріжжя

Результати та обговорення. У контексті визначення внеску господарської діяльності у формування складу атмосферного аерозолі, дослідження засвідчили умовність поділу речовини, завислої у приземному атмосферному

повітрі району досліджень, за типами джерел надходження на природну та антропогенну. Це пов'язано з тим, що утворення еолової зависі можливе з натурної речовини одного складу під впливом різних причин –

вітрової активності чи різноманітних технологічних процесів у межах території промислових виробництв. Більш доцільним може бути розподіл складових атмосферного аерозолі на типову для природних умов району досліджень та привнесену (чи утворену) під впливом господарської діяльності людини. Така класифікація передбачає виявлення природного складу еолової зависи, що також є відносно умовним показником. Аналіз результатів наших досліджень засвідчив, що найбільш об'єктивними показниками природної та антропогенної часток можуть розглядатись лише біогенна складова (пилі, фрагменти рослин, спори і т. д.) та, відповідно, продукти викидів у процесі застосування промислових високотемпературних технологій, представлені сферичними утвореннями. На жаль, обидві складові не є домінуючими у складі натурної речовини атмосферних потоків.

Склад та характеристики антропогенної частки атмосферної речовини у межах Запоріжжя пов'язані, у першу чергу, з промисловим сегментом міста. Чорна металургія, феросплавне виробництво, коксохімічна промисловість, кольорова металургія – основні антропогенні "донори" атмосферних потоків. Значна частина утвореного промисловою аерозолі – змішаного походження, тобто складається з частинок переведеної у завислий стан складової поверхні місцевих ґрунтів, привнесених у ході промислових процесів фрагментів руди, вугілля, а також, відповідно, продуктів їх переробки та спалювання.

Одним із показників змін у співвідношенні природна / антропогенна частка у речовинному складі аерозолі може бути сезонний взаємозв'язок із зовнішніми природними факторами, що визначатиметься перерозподілом кількісних співвідношень між конденсованою та диспергованою частинами еолової зависи. При цьому аерозолі дезінтеграції мають бути прив'язані до природних процесів вивітрювання гірських порід та переведу їх атмосферними збуреннями з поверхні ґрунтів у завислий стан, а також різноманітних антропогенних технологічних процесів подрібнення твердих речовин. Аерозолі конденсації, у свою чергу, утворюються внаслідок високотемпературних процесів, у т. ч. при конденсації випаровувань за участі металоїдів, металів та їх сполук при плавленні, електричному зварюванні і газовому різанні металів. Таким чином, антропогенна складова атмосферного аерозолі буде представлена обома генетичними типами частинок, при цьому її надходження у повітря буде визначатись передусім виробничими процесами. Природні фактори, головним чином, матимуть на них вплив вже у процесі розподілу в повітрі (тривалість пе-

ребування в атмосфері, дальність та швидкість переносу). Одночасно факторами, що мають найбільший вплив на збагачення еолової зависи аерозоліми дезінтеграції для району досліджень, будуть сила та тривалість вітрів і інтенсивність опадів. Останнє було засвідчено результатами наших досліджень – у періоди послаблення природних процесів надходження речовини в атмосферне середовище відбувались зміни у розподілі конденсаційної та диспергаційної складових у відібраних зразках еолової зависи (Насєдкін та ін., 2013).

Як зазначалось, речовинно-генетичний склад аерозолі диспергації (дезінтеграції) у приземному повітрі залежить від природних процесів вивітрювання типових для району гірських порід денної поверхні ґрунтів та переведу їх атмосферними збуреннями у завислий стан, а також різноманітних антропогенних технологічних процесів подрібнення твердих речовин, як привнесених, так і типових для району досліджень. Відповідно, розподіл компонентів цієї категорії еолової зависи на типову для літосферного середовища району досліджень та привнесену (пов'язану з техногенними процесами) можливий на основі вивчення речовини, що складає денну поверхню ґрунтів території Запоріжжя.

Попередні дослідження поверхневого шару ґрунтів території досліджень засвідчили, що основною їх компонентою є зерна кварцу, польових шпатів та їх уламки, а також змішаношаруваті утворення хлорит-іліт-монтморилоніту, тобто уламкова та дрібнодисперсна складова продуктів вивітрювання гірських порід. При цьому, безумовно, необхідно враховувати факт привнесения у поверхневі ґрунти зазначеної території нетипових речовин у процесі активної господарської (промислової) діяльності на протязі багатьох десятиліть.

Одночасно мінеральний склад уламкової складової зразків еолової речовини звертає на себе увагу насамперед наявністю суттєвої кількості частинок металів та їх оксидів, зокрема заліза (рис. 2).

При цьому уламкова складова може сягати алевритової розмірності, а вміст заліза перевищувати 90 %. Уламковій складовій, представленій оксидом заліза, властиві мікродомішки ряду чорних та важких металів, зокрема титану, марганцю, нікелю, міді, свинцю, цинку. Важкі метали також зустрічаються у вигляді окремих утворень, де їх вміст може перевищувати 50 %, а за представленню нами класифікацією їх можна віднести як до уламкових, так і конденсаційних утворень. Це стосується також і вмісту деяких благородних металів, зокрема золота (рис. 3).

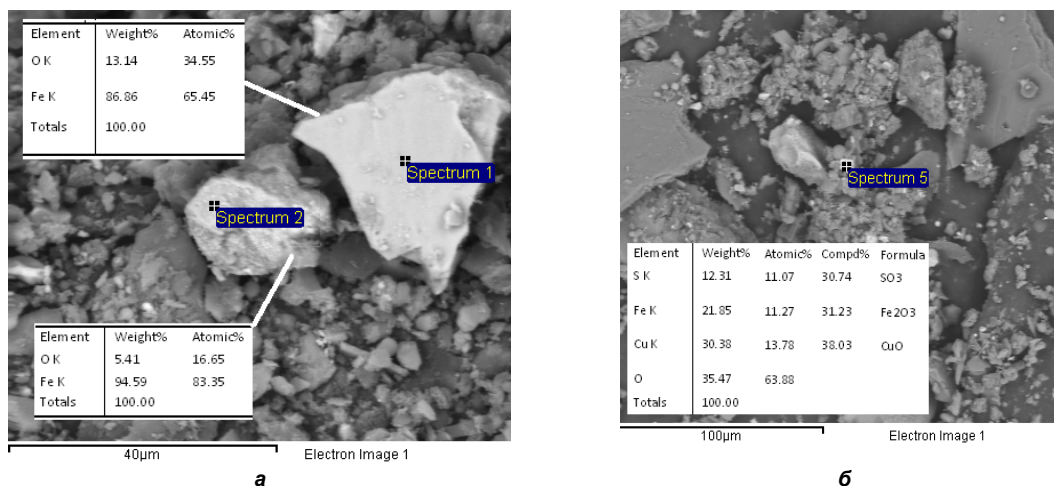


Рис. 2. Електронномікроскопічні знімки:

- а) уламкові фрагменти оксиду заліза, де вміст Fe > 90 % (період відбору речовини: червень-липень 2017 р.);
 б) аерозольна частинка із вмістом міді > 30 % (період відбору речовини: серпень-вересень 2015 р.)

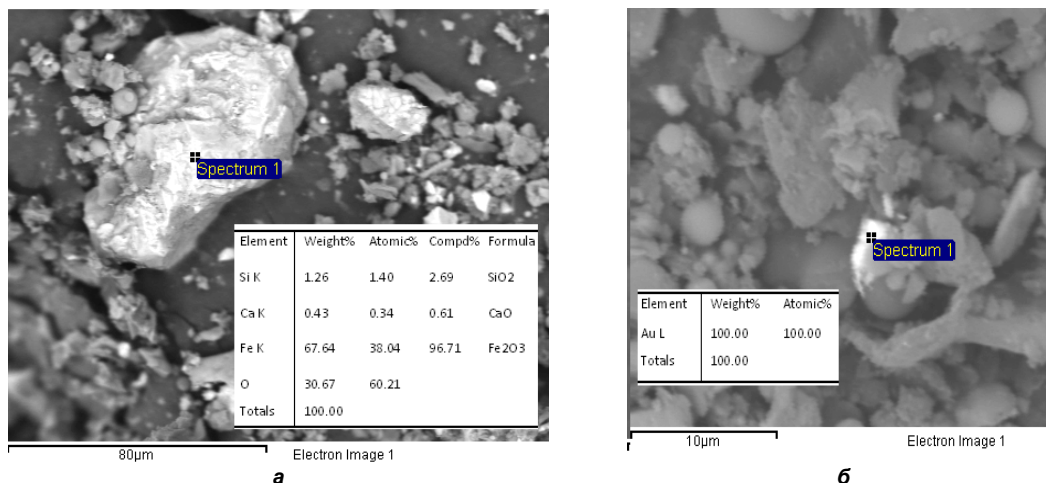


Рис. 3. Електронномікроскопічні знімки:

- а) уламковий фрагмент оксиду заліза в еоловій завісі періоду відбору березень-травень 2016 р., що перевищує 0,08 мм;
б) золото у складі аерозольної частинки (грудень – січень 2015–2016 рр.)

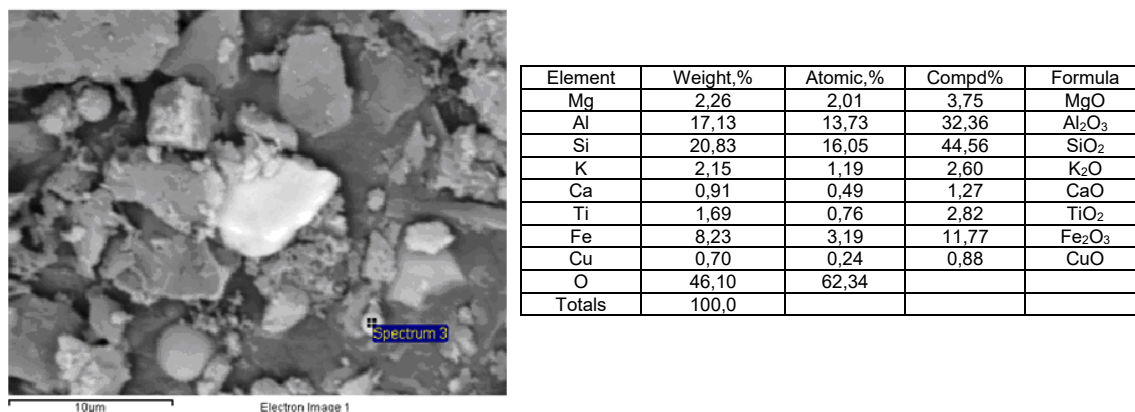


Рис. 4. Електронномікроскопічний знімок фрагменту проби за червень-липень 2016 р. та таблиця хімічного складу сферули (позначена на знімку)

Аерозолі конденсації, як зазначалось, значною мірою утворюються внаслідок високотемпературних процесів та за своїми розмірами значно менші за аерозолі дезінтеграції і складаються з окремих частинок правильної кристалічної або кулястої форми. Аналіз конденсаційної складової у пробах аерозолу за період досліджень дозволив надати їх загальну характеристику та виявити певні особливості (рис. 4). По-перше, слід зазначити, що мінеральний склад більшості досліджуваних сферул (60–70 %) представлено алюмосилікатами з домішкою заліза та ряду хімічних елементів, а також у ряді проб – мікродомішками важких металів (здебільшого цинку та міді).

Розмір цієї компоненти еолової завіси у середньому становить 5–20 мкм, але окремі сферули сягають розміру 50 мкм.

Вважається (*Ценосфера, н.д.*), що утворення порожнистих алюмосилікатних кульок (ценосфер) головним чином відбувається в топках за високотемпературного факельного спалювання вугілля на ТЕС та ГРЕС. Під час згорання тонкоподрібнених частинок вугілля домішки оксиду алюмінію, кремнію та інших елементів, присутніх у природному вугіллі, при високій температурі утворюють складні силікати, що приймають у розплавленому стані сферичну форму (рис. 5).

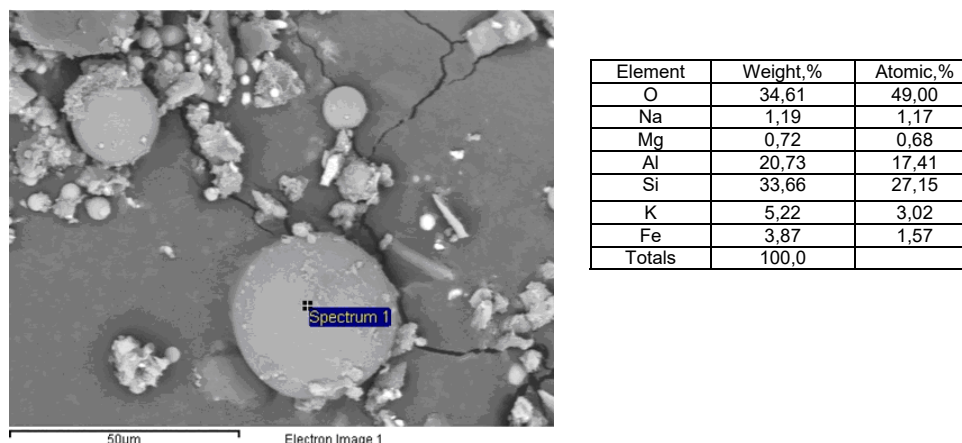


Рис. 5. Електронномікроскопічний знімок фрагменту проби за листопад-грудень 2016 р. та таблиця хімічного складу сферули (позначена на знімку)

За рахунок розчинених у силікатах газів відбувається роздування сферичних мікрокрапель у найдрібніші бульбашки – мікросфери, діаметр яких може сягати 500 мкм. При цьому вони мають форму, близьку до сферичної і гладку зовнішню поверхню. Газова фаза, законсервована усередині мікросфер, складається в основному з азоту, кисню і оксиду вуглецю.

Друга група аерозолів конденсації представлена сферулами, основною складовою яких є оксид заліза. Розмір цих утворень помітно менший за алюмо-

силікатні ценосфери, і становить у середньому 3–10 мкм. При вмісті у конденсаційній складовій, що не перевищує 35–40 %, ці компоненти значно частіше, ніж алюмосилікатні утворення, мають у домішках важкі метали (мідь та цинк) (рис. 6).

Окрім різниці у розмірах, кульки, представлені оксидом заліза у відібраних пробах аерозолі, не завжди мають правильну форму та гладку поверхню, чим візуально відрізняються від алюмосилікатних сферул (рис. 7).

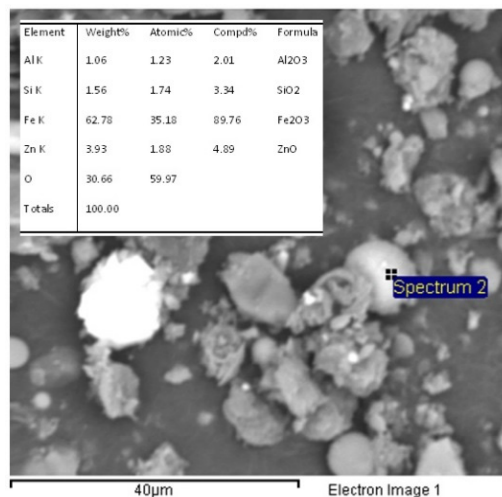
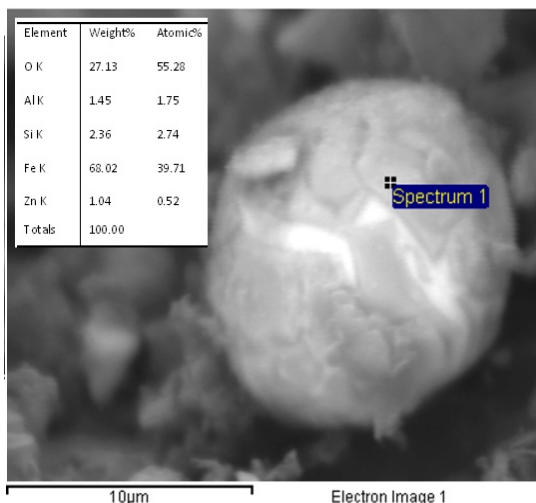
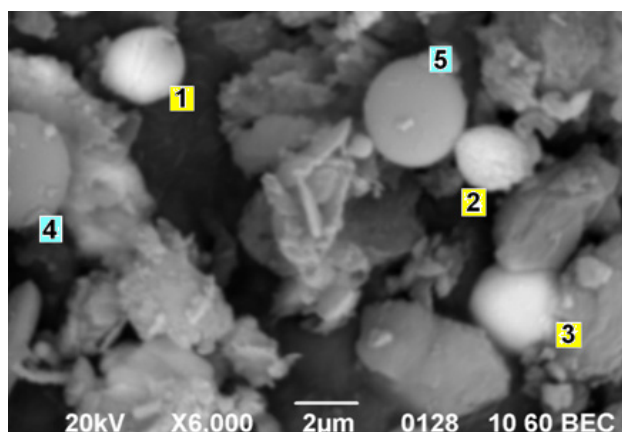


Рис. 6. Електронномікроскопічний знімок фрагменту проби за січень-лютий та червень 2016 р.



1		
Element	Weight, %	Atomic, %
O	30,95	58,30
Al	2,85	3,18
Si	5,33	5,71
Fe	60,29	32,54
Zn	0,59	0,27
Totals	100,0	
2		
Element	Weight, %	Atomic, %
O	6,28	17,73
Al	2,08	3,48
Si	5,84	9,41
Fe	85,79	69,38
Zn		
Totals	100,0	

3		
Element	Weight, %	Atomic, %
O	31,19	58,90
Al	1,89	2,11
Si	5,21	5,60
K	0,76	0,59
Fe	58,66	31,74
Zn	2,29	1,06
Totals	100,0	

4		
Element	Weight, %	Atomic, %
O	38,14	53,92
Na	1,08	1,06
Mg	1,11	1,03
Al	16,11	13,51
Si	30,18	24,31
K	3,68	2,13
Ca	0,71	0,40
Fe	8,99	3,64
Totals	100,0	

5		
Element	Weight, %	Atomic, %
O	47,15	62,59
Na	0,80	0,74
Mg	0,96	0,84
Al	15,85	12,47
Si	24,96	18,87
K	2,77	1,50
Ca	0,82	0,43
Fe	6,69	2,54
Totals	100,0	

Рис. 7. Електронномікроскопічний знімок фрагменту проби за вересень-жовтень 2016 р. та хімічний склад сферул, позначених на знімку

джерелами походження залізистих сферул в атмосферному аерозолі промислових осередків, за літературними даними (Меньшикова та Осовецький, 2015), є в основному підприємства металургійного та коксохімічного профілю, а також деякі муніципальні об'єкти. Їх надходження в повітря пов'язане з процесами металообробки, викидами металургійної промисловості та іншими техногенними процесами з використанням високих температур.

Існують також інші джерела надходження в атмосферні потоки складової подібного типу, але їх вплив на формування речовинного складу еолової завіси у районі досліджень несуттєвий. Зокрема, це магнітні сферули, що надходять на земну поверхню з космічною речовиною. Характерними ознаками космічного походження сферичних утворень (ознаки космогенної складової у зразках пилу) вказуються (Цельмович та Булат, 2014) насамперед підвищений вміст нікелю і титану, зональна будова, наявність самородних металів (Fe, Ni, Cr, Co, W)

та інші. Також утворення, морфологічно схожі на досліджувані, можуть мати ендегенне походження і знаходитись у покладах, пов'язаних з інтрузивними і ефузивними процесами (Яценко та ін., 2012).

У конденсаційній складовій аерозолей, відібраних з атмосферного повітря Запоріжжя, домішки нікелю, на протилежність міді та цинку, майже відсутні. Загалом, наявність на відстані до 10 км від точки моніторингу таких потужних промислових осередків, як "Запоріжсталь", "Дніпроспецсталь", "Запорізький завод феросплавів", "Запоріжжюкс", "Запорізький титано-магнієвий комбінат", "Запорізький залізорудний комбінат", "Запорізький виробничий алюмінієвий комбінат" та ін., зводить до мінімуму сенс врахування в пробах відібраної речовини відсотку сферул нетехногенного походження.

Також присутня суттєва кількість сферул без явного домінування заліза чи алюмінію в їх хімічному складі. Взаємний розподіл алюмосилікатних чи залізовмісних конденсаційних частинок, зважаючи на різні технологічні процеси, що призводять до їх утворення, не має за період спостережень певних сезонних залежностей чи зв'язку з розподілом атмосферних процесів. У свою чергу, загальний вміст уламкової складової у пробах атмосферної речовини може помітно коливатись для різних місяців, а протягом року спостерігається незначне зменшення її в теплий період і збільшення в осінній та зимові місяці.

Висновки. Дослідження особливостей складу атмосферного аерозолі в приземному повітрі м. Запоріжжя на основі тривалого натурального моніторингу та комплексного аналізу отриманих зразків речовини дозволили визначити ряд закономірностей у розподілі різних речовинно-генетичних типів частинок еолової зависі, у т. ч. складової техногенних процесів. Одним із показників впливу промислових комплексів, зокрема металургійних, на речовинний склад завислої атмосферної речовини, є суттєвий вміст заліза, що в середньому становить 230 мг/кг, а в окремі періоди може сягати 400 мг/кг. Проведений попередній аналіз морфологічних особливостей, гранулометричного та хімічного складу залізовмісних частинок повітряної зависі визначив їх основні генетичні типи, а також зв'язок з рядом забруднювачів, зокрема важких металів. Співвідношення конденсаційної та диспергаційної складових частинок техногенного походження, між іншим, може свідчити щодо ступеня впливу високотемпературних промислових процесів на мінеральний та хімічний склад компонентів еолової зависі.

Окреслюючи перспективу подальших досліджень, слід зазначити необхідність комплексного підходу до визначення кількісних та якісних показників антропогенної компоненти атмосферного аерозолі в повітрі Запоріжжя, що сприятиме результативності наукового пошуку. Сьогодні, завдяки співпраці з фахівцями ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка, у процес аналітичної обробки отриманого натурального матеріалу залучено методи магнітних досліджень, а також відібрано зразки аерозольної речовини з фільтрів очисних установок найбільшій підприємств-забруднювачів металургійного комплексу Запоріжжя. Подальші комплексні аналітичні дослідження на основі безперервних режимних спостережень за розподілом завислої речовини атмосферних та водних потоків, техногенної складової ґрунтів та донних відкладів дозволять вирішити визначені проектом завдання, а також розробити певні рекомендації з поліпшення екологічного стану території цього індустріального осередку.

Список використаних джерел

Меньшикова, Е.А., Осовецкий, Б.М. (2015). Магнитные сферулы природно-техногенных осадков. *Современные проблемы науки и образования*, 1 (Ч. 1). Отримано 3 жовтня 2017, із <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18203>.

Меньшов, О.І. (2014). Перші результати атмомагнітного контролю стану довкілля на прикладі міста Київ. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 11, 178–184.

Митропольський, О.Ю., Наседкін, Є.І., Федосєєнков, С.Г., Іванова, А.М., Довбиш, С.М. (2016). Відновлення та адаптація проекту моніторингу седиментаційних процесів на шельфі Чорного моря на полігоні "Запоріжжя". *Геологія і полезні ископаемые мирового океана*, 3, 89–94.

Наседкін, Є.І., Митропольський, О.Ю., Іванова, Г.М. (2013). Моніторинг седиментаційних процесів у зоні взаємодії суходолу та моря: монографія. Київ, Севастополь: НВЦ "ЕКОСІ-Гідрофізика". ISBN: 978-966-02-7171-5.

Наседкін, Є.І. (2017). Геохімічні аспекти досліджень атмосферного аерозолі м. Запоріжжя. *Мінералогічний журнал*, 2 (39), 57–63.

Цельмович, В.А., Булат, С.А. (2014). Выделение космогенной компоненты. В кн. Проблемы изучения космической пыли на Земле (К программе исследования) (с. 44). Дубна: Объединенный институт ядерных исследований.

Ценосфери. (н.д.). Отримано 3 жовтня 2017, із <https://uk.wikipedia.org/wiki/Ценосфери>.

Яценко, І., Яценко, Г., Бекеша, С., Білик, Н., Варичев, О., Дручок, Л. (2012). Ендегенні Ті-Мн-Fe-силікатні сферули із експлозивних структур та вулканогенно-осадкових формацій України. *Мінералогічний збірник Львівського національного університету імені Івана Франка*, 62 (1), 83–101.

Bondar, K. M., Tsiupa, I. V., Kozhemiakin, H. B., Kuraieva, I. V., Voitiuk, Y. Y. (2017). Magnetic minerals and heavy metals content of industrial dusts and polluted topsoil of Zaporizhzhya (Ukraine). *Proc. 16th International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects*, 15–17 May, Kiev, Ukraine, 561–566.

Shu, J., Dearing, J. A., Morse, A. P., Yu, L., Yuan, N. (2001). Determining the sources of atmospheric particles in Shanghai, China, from magnetic and geochemical properties. *Atmospheric Environment*, 35(15), 2615–2625.

Zhou, S., Yuan, Q., Li, W., Lu, Y., Zhang, Y., Wang, W. (2014). Trace metals in atmospheric fine particles in one industrial urban city: Spatial variations, sources, and health implications. *Journal of Environmental Sciences*, 26(1), 205–213.

References

Bondar, K., Tsiupa, I., Kozhemiakin, H., Kuraieva, I., Voitiuk, Y. (2017). Magnetic minerals and heavy metals content of industrial dusts and polluted topsoil of Zaporizhzhya (Ukraine). *Proc. 16th International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects*, 15–17 May, Kiev, Ukraine, 561–566.

Cenosphere. (n.d.). Retrieved October 3, 2017, from <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ценосфера> [in Russian]

Menshikova, E., Osovetsky, B. (2015). Magnetic sphaerules in natural-technogenic sediments. *Modern problems of science and education*, 1 (Part 1). Retrieved October 3, 2017, from <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18203> [in Russian]

Menshov, O. (2014). The first results of the atmomagnetic control of environment. Case study from Kyiv. *Geoinformatika*, 11, 178–184. [in Ukrainian]

Mytropolskyi, O., Nasedkin, Ye., Fedoseienkov, S., Ivanova, A., Dovbysh, S. (2016). Recovery and adaption of the project of monitoring sedimentary processes on the Black Sea shelf at the testing ground "Zaporizhzhia". *Geology and mineral resources of World Ocean*, 3, 89–94. [in Ukrainian]

Nasedkin, Ye., Mytropolskyi, O., Ivanova, G. (2013). Monitoring of sedimentation processes in the land and sea of interaction zone. EKOSI-Gidrofizika: ISBN: 978-966-02-7171-5. [in Ukrainian]

Nasedkin, Ye. (2017). Geochemical research aspects of atmospheric aerosol of Zaporizhzhia city. *Mineralogical journal*, 2(39), 57–63. [in Ukrainian]

Shu, J., Dearing, J. A., Morse, A. P., Yu, L., Yuan, N. (2001). Determining the sources of atmospheric particles in Shanghai, China, from magnetic and geochemical properties. *Atmospheric Environment*, 35(15), 2615–2625.

Tsel'movich, V., Bulat, S. (2014). Vydelenie kosmogennoi komponenty. In Problemy izucheniya kosmicheskoi pyli na Zemle (k programme issledovaniya) (p. 44). Dubna: Russia: Ob'edinennyi institut yadernykh issledovaniy. [in Russian]

Yatsenko, I., Yatsenko, G., Bekesha, S., Varychev, O., Druchok, L. (2012). Endogenous Ti-Mn-Fe-silicate spherules from explosive structures and volcanic-sedimentary formations of Ukraine. *Mineralogical Review of I. Franko Lviv National University*, 62 (1), 83–101. [in Ukrainian]

11. Zhou, S., Yuan, Q., Li, W., Lu, Y., Zhang, Y., Wang, W. (2014). Trace metals in atmospheric fine particles in one industrial urban city: Spatial variations, sources, and health implications. *Journal of Environmental Sciences*, 26(1), 205–213.

Надійшла до редколегії 11.07.18

Ye. Nasedkin, Cand. Sci (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: nasedevg@ukr.net
G. Ivanova, Cand. Sci (Geol.), Researcher,
E-mail: a_1207@ukr.net,
S. Stadnichenko, Cand. Sci (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: stadnik_sm@ukr.net
Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine,
55-B O. Gonchara Str., Kyiv, 01054, Ukraine
O. Andreev, Cand. Sci (Geol.-Min.), Senior Researcher,
E-mail: andreev@univ.kiev.ua
V. Morozenko, Cand. Sci (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: vmorozenko@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ANTHROPOGENIC COMPONENT OF ATMOSPHERIC AEROSOL SUBSTANCE OF ZAPORIZHZHIA CITY

The article is devoted to the study of the influence of technogenic processes on the environment, in particular the determination of the contribution of a substance formed in the course of economic activity to the total composition of the solid component of atmospheric aerosol. The actual material was obtained on the basis of the system monitoring of surface air flows within such a powerful industrial center as Zaporizhzhia city. Samples of suspended atmospheric matter accumulated on the filter textile were taken monthly for two years. Parallel continuous observations of hydrometeorological factors (speed, direction, duration of winds, rainfall) provided an integrated approach to the development and synthesis of research results. Field observations and laboratory studies determined a number of patterns in the distribution of the sedimentation substance in the air and the interrelations of the anthropogenic and natural constituents of the substance. The publication describes the features of the chemical composition and morphology of detrital particles, the entry of which into the air caused by technogenic processes, as well as the condensation component of the aeolian suspension, the origin of which is associated with high-temperature processes. The changes in the ratio of the natural / anthropogenic components in the material composition of the aerosol under the influence of external factors (natural and anthropogenic) were investigated. These changes also affect the redistribution of quantitative ratios between the condensed and dispersed components of the aeolian suspension.

At the same time, the detrital component can reach the aleuritic dimension, the iron content exceeds 90%, and the proportion of impurities of a number of ferrous and heavy metals, in particular titanium, manganese, nickel, copper, lead, zinc can reach 40% or more. Heavy metals are also found in the form of separate detrital and condensation formations, where their content varies in the range of 50 - 70%. Analysis of the condensation component in the aerosol samples for the period of the research allowed us to give a general characteristic of it and to carry out a preliminary classification by chemical composition. The possibility of determining the focus of atmospheric pollution in terms of the shape, chemical composition and size of aerosols, seasonal factors and characteristics of atmospheric flows were also outlined.

Keywords: atmospheric aerosol, monitoring, heavy metals.

Е. Наседкин, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: nasedevg@ukr.net
А. Иванова, канд. геол. наук, науч. сотр.,
E-mail: a_1207@ukr.net
С. Стадниченко, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: stadnik_sm@ukr.net
Институт геологических наук НАН Украины,
ул. О. Гончара, 55-Б, г. Киев, 01054, Украина
А. Андреев, канд. геол.-минералог. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: andreev@univ.kiev.ua
В. Морозенко, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: vmorozenko@ukr.net
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ОБ АНТРОПОГЕННОЙ КОМПОНЕНТЕ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ Г. ЗАПОРОЖЬЯ

Статья посвящена исследованию влияния техногенных процессов на окружающую среду, в частности, определению привноса вещества, образованного в процессе хозяйственной деятельности, в общий состав твердой компоненты атмосферного аэрозоля. Фактический материал был получен на основе системного мониторинга приземных воздушных потоков в пределах такого мощного индустриального центра как г. Запорожье. Отбор накопленных на фильтровальной ткани проб взвешенного атмосферного вещества проводился ежемесячно в течение двух лет. Параллельные непрерывные наблюдения за гидрометеорологическими факторами (скорости, направления, продолжительность ветров, количество осадков) обеспечили комплексный подход к разработке и обобщению результатов исследований. Натурные наблюдения и лабораторные исследования определили ряд закономерностей распределения седиментационного вещества в воздухе и взаимосвязей антропогенной и природной составляющих вещества. В публикации рассмотрены особенности химического состава и морфологии обломочных частиц, поступление которых в воздух обусловили техногенные процессы, а также конденсационной составляющей золовой взвеси, происхождение которой связано с высокотемпературными процессами. Исследованы изменения в соотношении естественная / антропогенная составляющие в вещественном составе аэрозоля под влиянием внешних факторов (природных и антропогенных). Эти изменения сказываются также на перераспределении количественных соотношений между конденсированной и диспергированной составляющими золовой взвеси. При этом обломочная составляющая может достигать алевроитовой размерности, содержание железа превышать 90 %, а доля примесей ряда черных и тяжелых металлов, в частности титана, марганца, никеля, меди, свинца, цинка, достигать 40 % и более. Тяжелые металлы также встречаются в виде отдельных обломочных и конденсационных образований, где их содержание колеблется в диапазоне 50–70 %. Анализ конденсационной составляющей в пробах аэрозоля за период исследований позволил дать ей общую характеристику и провести предварительную классификацию по химическому составу. Также намечена возможность определения очагов атмосферного загрязнения среды по форме, химическому составу и размеру аэрозолей, сезонным факторам и характеристикам атмосферных потоков. Исследования показали целесообразность уточнения параметров действующих нормативов системы экологического контроля качества воздуха с учетом ряда выявленных закономерностей. В перспективе необходим комплексный подход к определению количественных и качественных показателей антропогенной компоненты атмосферного аэрозоля в воздухе Запорожья, что будет способствовать результативности научного поиска.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, мониторинг, тяжелые металлы.

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 550.834

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.kiev.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна
І. Соловійов, ген. директор,
E-mail: i.solovyov@geounit.com.ua
В. Круглик, пров. геолог,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com
Г. Лісний, д-р геол. наук, доц., заст. ген. директора,
E-mail: g.lisny@geounit.com.ua
ТОВ "ГЕОЮНІТ", пр. С. Бандери, 9, м. Київ, 04073, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРАКТИВНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ГЕОЛОГІЧНИХ ТІЛ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКЛАДІВ ГАЗУ НА СХОДІ УКРАЇНИ

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

Розглянуто можливості виділення геологічних тіл з певними фізичними та фільтраційно-ємнісними властивостями на основі класифікації за набором сейсмічних атрибутів. Така класифікація базується на використанні комп'ютерних технологій з паралельними обчисленнями на графічних процесорах. Висока швидкість паралельних обчислень забезпечує можливість інтерактивної класифікації та отримання результатів практично у реальному часі. Водночас застосування графічних процесорів дозволяє реалізувати технології інтерактивної класифікації не тільки на обчислювальних кластерах, але і на персональних комп'ютерах.

Показано геологічну ефективність технологій інтерактивної класифікації. Їх застосування дозволяє виявляти геологічні тіла з певними фізичними властивостями на основі комп'ютерного аналізу тривимірних масивів сейсмічних даних, зокрема сейсмічних зображень та масивів сейсмічних атрибутів. Важливо відмітити, що комп'ютерні технології інтерактивної класифікації тривимірних сейсмічних даних не тільки забезпечують високу швидкість визначення просторового положення та властивостей геологічних тіл, але і дозволяють реалізувати принципову можливість такого визначення. Традиційні підходи до виявлення та класифікації геологічних тіл базуються на послідовному аналізі розрізів тривимірних сейсмічних даних. У цьому випадку розв'язання задачі виявлення та класифікації геологічних тіл часто стикається з принциповими проблемами через складність візуальної оцінки тривимірних геологічних об'єктів на основі аналізу послідовності двовірних розрізів масивів сейсмічних даних.

Авторами запропоновано зручний підхід до систематизації способів інтерактивної класифікації геологічних тіл за одним та кількома сейсмічними атрибутами. Відомі технології яскравої плями та AVO розглядаються як елементи послідовності способів інтерактивної класифікації з використанням різної кількості сейсмічних атрибутів.

За даними об'ємної сейсморозвідки, проведеної на площах сходу України, виконано класифікацію геологічних тіл за одним та двома сейсмічними атрибутами. Знайдено та проаналізовано об'єкти, що є перспективними щодо наявності в них вуглеводнів. Зроблено висновки про доцільність класифікації за декількома параметрами, що створює передумови для реалізації більш досконалих та різнобічних підходів до виявлення геологічних тіл із заданими фізичними властивостями.

Ключові слова: сейсмічне зображення, сейсмічна інверсія, інтерактивна класифікація, сейсмічні атрибути, geobody, прямі індикатори вуглеводнів.

Вступ. Успішність пошуків та розвідки родовищ нафти і газу безпосередньо пов'язана з використанням прямих сейсмічних індикаторів наявності вуглеводнів. Актуальність такого підходу зумовлена збільшенням значення літологічних пасток вуглеводнів у загальному об'ємі видобутку нафти і газу. Про це свідчить також збільшення кількості публікацій, в яких цей напрям сейсморозвідувальних досліджень розглядається на основі сучасних технологічних рішень (Forrest et al., 2010; Rudolph and Goulding, 2017; Roden and Chen, 2017; Вижва та ін., 2018).

Використання тривимірних сейсмічних даних для вивчення та аналізу прямих індикаторів вуглеводнів передбачає визначення об'ємних розподілів їх значень. Традиційні підходи до аналізу тривимірних масивів сейсмічних зображень та атрибутів через їх двовірні розрізи втрачає достовірність через збільшення впливу суб'єктивного фактору. Рішення цієї проблеми можна отримати через використання технології інтерактивної класифікації хвильових полів та сейсмічних атрибутів. Така технологія дозволяє знаходити об'ємні об'єкти, що характеризуються певними діапазонами зміни значень їх характеристик. Важливим окремим випадком застосування технології об'ємної класифікації є виявлення аномалій AVO, що характеризуються певними діапазонами змін атрибутів AVO.

У даній роботі розглянуто результати застосування технології об'ємної класифікації особливостей сейсмічних полів та атрибутів для південно-східної частини північного борту Дніпровсько-Донецької западини.

Принципи об'ємної класифікації. Моделювання резервуарів вуглеводнів передбачає виділення в їх межах пасток нафти або газу. Під час комп'ютерного моделювання резервуари подаються набором комірок, що асоціюються з певними фізичними характеристиками або сейсмічними атрибутами. Фізичними характеристиками можуть бути огинаюча сейсмічного сигналу, акустичний імпеданс, пористість тощо. Набір зв'язаних комірок будемо називати geobody (геологічне тіло). Процедура визначення geobody полягає у знаходженні зв'язаних комірок, що відповідають заданому діапазонам змін фізичних характеристик. Важливим елементом виявлення геологічних тіл є врахування їх фізичного об'єму, адже дуже малі тіла не становлять практичного інтересу.

Для виділення геологічних тіл у моделях резервуарів застосовувалися різні підходи та технології. Наприклад, у роботі (Hoshen and Kopelman, 1976) запропоновано спосіб виділення геологічних тіл за допомогою принципів кластерного аналізу. Процес обчислень за цією технологією виконувався за допомогою CPU (центрального процесора) та вимагав багато обчислювального часу. Алгоритм, започаткований у роботі (Deutsch, 1998) передбачав сканування тривимірної сітки комірок геологічної моделі окремо уздовж напрямків X, Y, Z . У результаті сканування виділялися зв'язані комірки, що задовольняли заданий діапазон значень атрибутів. Відповідні обчислювальні програми також були реалізовані на CPU, що призводило до істотних витрат обчислювального часу.

Не зупиняючись на детальному огляді різних способів класифікації геологічних тіл або geobody-аналізу, зазначимо, що вивчення резервуарів вуглеводнів, як правило, стикається з наявністю багатьох невідомих параметрів. Нормальним вважається також створення декількох альтернативних моделей для одного резервуару вуглеводнів. Кожна з цих моделей представляє можливі розподіли параметрів резервуару. Водночас для кожної моделі необхідно виконати geobody-аналіз, що передбачає виявлення геологічних тіл, визначення їх розмірів, взаємного впливу та зв'язку із свердловинами тощо. Таким чином, дуже важливою задачею є прискорення чисельного аналізу за умови використання стандартної комп'ютерної техніки. Сьогодні така задача успішно розв'язана за допомогою паралельних обчислень на графічних картах (GPU). Наприклад, процес geobody у програмному пакеті Petrel (Schlumberger) дозволяє отримувати результати з виділення геологічних тіл майже у реальному часі. Для оптимізації обчислень розробники програмного забезпечення, як правило, надають рекомендації щодо необхідних технічних характеристик комп'ютерів. Щодо GPU такі рекомендації стосуються, в основному, необхідної кількості графічних процесорів для виконання обчислень. Сьогодні сучасні GPU містять декілька тисяч графічних процесорів. Це є достатнім для виконання обчислень у процесі geobody практично у реальному часі.

Класифікація геологічних тіл за одним сейсмічним атрибутом. Розглянемо ділянку в південно-східній частині Північного борту Дніпровсько-Донецької западини, що є перспективною на наявність вуглеводнів. У цій зоні можна виділити Південномакіївську площу, структурні пастки вуглеводнів якої приурочені до відкладів башкирського та московського ярусів середнього карбону. Ці пастки характеризуються незначними ресурсами вуглеводнів та відповідно слабо вираженим структурним фактором. За таких умов важливого значення набуває прогнозування покладів вуглеводнів за допомогою прямих сейсмічних індикаторів наявності нафти і газу в геологічному середовищі. Ефективним способом реалізації такого прогнозування є об'ємна класифікація сейсмічних атрибутів та пов'язаних із ними геологічних тіл з певними фізичними властивостями. Існуючі технології такої класифікації використовують різну кількість атрибутів.

Найпростішою є класифікація на основі одного сейсмічного атрибуту. Характерним її прикладом є виявлення підвищених значень огинаючої сейсмічних сигналів. Аномалії підвищених значень огинаючої сейсмічних сигналів відомі також як аномалії типу "яскравих плям". Ефективність технології "яскравих плям" зумовлена тим, що відбиття від пластів газонасиченої гірської породи або породи з низькими значеннями акустичного імпедансу характеризуються значно більшими амплітудами порівняно із хвилями, відбитими від пластів, насичених нафтою або водою.

Для виявлення перспективних на наявність вуглеводнів ділянок у даній роботі використано технологію об'ємної класифікації geobody, що входить до програмного пакету Petrel (Schlumberger). Обмежимо діапазон значень огинаючої сейсмічного сигналу лише великими значеннями. Отриманий результат показаний на рис. 1. Він дозволяє виявити об'ємні елементи геологічного розрізу, перспективні на наявність природного газу. Це зумовлено підвищеними значеннями коефіцієнтів відбиття на межі розділу газонасиченої та ущільненої гірської породи.

Однак підвищені значення коефіцієнтів відбиття можуть характеризувати також межі розділу гірських порід з іншими фізичними властивостями. Наприклад, підвищені значення огинаючої сейсмічного сигналу можуть бути приурочені до меж пластів карбонатів, вугілля, інтрузій тощо. Для підтвердження актуальності виділених тривимірних об'єктів щодо наявності у них природного газу необхідно залучити свердловинні дані.

На рис. 2 показаний один із геологічних об'єктів, виділений за допомогою технології geobody. Цей об'єкт приурочений до продуктивного пласта у відкладах башкирського ярусу середнього карбону. Свердловина, що його перетинає, підтверджує наявність у ньому природного газу. Це означає, що даний геологічний об'єкт з визначеною формою та об'ємом є пасткою вуглеводнів. Водночас інші геологічні об'єкти даної площі, що характеризуються аналогічними значеннями огинаючої сейсмічного сигналу, також можна вважати пастками вуглеводнів. Достовірність такого прогнозування для даної площі, що визначена за результатами буріння свердловин, становить близько 80 %.

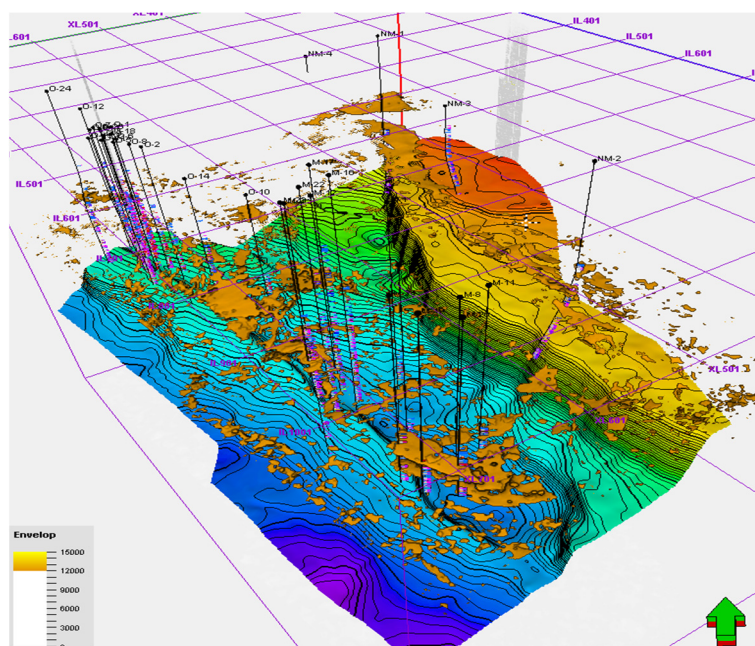


Рис. 1. Просторовий розподіл тривимірних геологічних об'єктів, що відповідають підвищеним значенням огинаючої сейсмічного сигналу

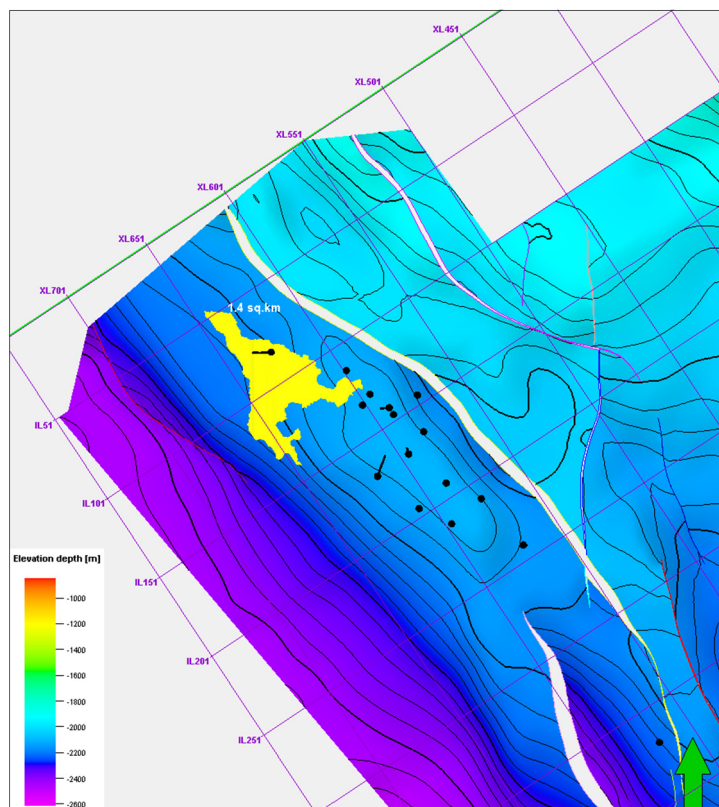


Рис. 2. Пастка вуглеводнів, що виділена у відкладах башкирського ярусу середнього карбону за допомогою технології geobody за критерієм підвищених значень огинаючої сейсмічного сигналу

Важливою характеристикою технології geobody є можливість виділяти тривимірні геологічні об'єкти, які складно, а інколи неможливо виявити через аналіз двовимірних розрізів об'ємних сейсмічних зображень або масивів сейсмічних атрибутів. Характерним прикладом таких геологічних об'єктів є флювіальні відклади, які відіграють значну роль у формуванні родовищ вуглеводнів і доволі поширені у світі. Це зумовлює відповідну увагу до вивчення флювіальних резервуарів, моделювання яких є широкою областю наукових досліджень. Значні варіації у розмірах таких резервуарів, їх неоднорідний характер та складні геометричні форми зумовлюють певні труднощі у побудові їх тривимірних моделей. Різноманітні технології фаціального моделювання використовуються для оптимізації розвідки родовищ флювіального типу. Однак певні алгоритмічні обмеження інколи призводять до надмірного спрощення моделей таких резервуарів. Це призводить до зменшення якості їх прогнозу. Наявність сучасної детальної сейсмічної та свердловинної інформації є передумовою для побудови достовірних моделей флювіальних резервуарів. У роботі (Vevle *et al.*, 2018) відзначається, що флювіальні та дельтові родовища є одними з найважливіших у світі. Вони набули практичного значення близько 30 років тому та залишаються актуальним дотепер. Багато великих родовищ представлені комбінацією різних річкових та дельтових відкладів. Однак, незважаючи на значний технологічний прогрес у галузі моделювання резервуарів вуглеводнів, проблеми вивчення флювіальних резервуарів у тривимірному поданні залишаються актуальними. Головною метою фаціального моделювання є отримання точного чисельного подання геологічної моделі резервуару, що використовується для подальшого його наповнення петрофізичними властивостями. Ефективним шляхом розв'язання цієї задачі є впровадження сучасних технологій аналізу сейсмічних та свердловинних даних.

Аналіз головних елементів флювіальних систем показує, що достовірність їх прогнозу залежить від детальності врахування неоднорідностей геологічного середовища. У загальному випадку флювіальні системи описуються композицією декількох фацій: руслових, дельтових, заплавних тощо. У результаті процесів осадконакопичення кожна з фацій утворює геологічні тіла, що мають особливі структурні моделі та відрізняються за фізичними властивостями гірських порід. Моделювання таких структур передбачає, перш за все, точне відтворення їх геометричних та фаціальних особливостей із врахуванням геологічних уявлень про родовище або площу, наявної геолого-геофізичної інформації, можливостей технологій, що використовуються, та відповідних програм об'ємного моделювання. Як приклад такого моделювання на рис. 3 показані стародавні руслові тіла у відкладах башкирського та московського ярусів середнього карбону. Такі руслові тіла є перспективними щодо наявності вуглеводнів у гірських породах, що їх складають. Прогнозні ресурси природного газу становлять приблизно 60 млн м³ для об'єкта у відкладах московського ярусу та 40 млн м³ у відкладах башкирського ярусу. У даному випадку традиційні підходи до виявлення таких геологічних тіл не дали позитивних результатів. Це пояснюється тим, що аналіз послідовності двовимірних розрізів сейсмічних зображень або масивів сейсмічних атрибутів не дає змогу прослідкувати напрями поширення руслових тіл через їх нерегулярну форму та відповідно невеликі розміри у розрізах об'ємного сейсмічного зображення або у розрізах тривимірних масивів сейсмічних атрибутів.

Класифікація геологічних тіл за набором сейсмічних атрибутів. Наведені вище приклади об'ємної класифікації передбачали використання одного сейсмічного атрибуту. Використання декількох атрибутів суттєво розширює можливості об'ємної класифікації. Характерним прикладом класифікації за двома параметрами або ат-

рибутами є технологія AVO. Вона дає змогу виділяти геологічні тіла, пов'язані зі змінами амплітуд сейсмічних хвиль залежно від відстані між їх джерелами та приймачами. У монографії (*Chopra and Castanga, 2014*) наведено вичерпні дані щодо класифікації аномалій AVO. Один з ефективних способів їх класифікації базується на аналізі кроспловів атрибутів AVO, а саме градієнта та інтерсепта. Ці атрибути визначають пряму лінію $R(\sin^2\theta)$, де θ – кут нахилу відбитого сейсмічного променя, R – амплітуда відбитої хвилі. З використанням цих позначень формула градієнта може бути записана у наступному вигляді: $G = \Delta R / \Delta \sin^2\theta$. А формула інтерсепта

набуває вигляду $I = R(0)$. Тобто фізичним змістом інтерсепта є амплітуда відбитої хвилі для нормального падіння. Визначення співвідношень між значеннями градієнта та інтерсепта дають можливість прогнозувати тип гірської породи, її фільтраційно-ємнісні властивості, а також тип флюїду що її насичує.

Поширена схема класифікації пісковиків за співвідношеннями значень градієнта та інтерсепта запропонована у роботі (*Rutherford and Williams, 1989; Castanga et al., 1998*), узагальнену класифікацію наведено в (табл. 1).

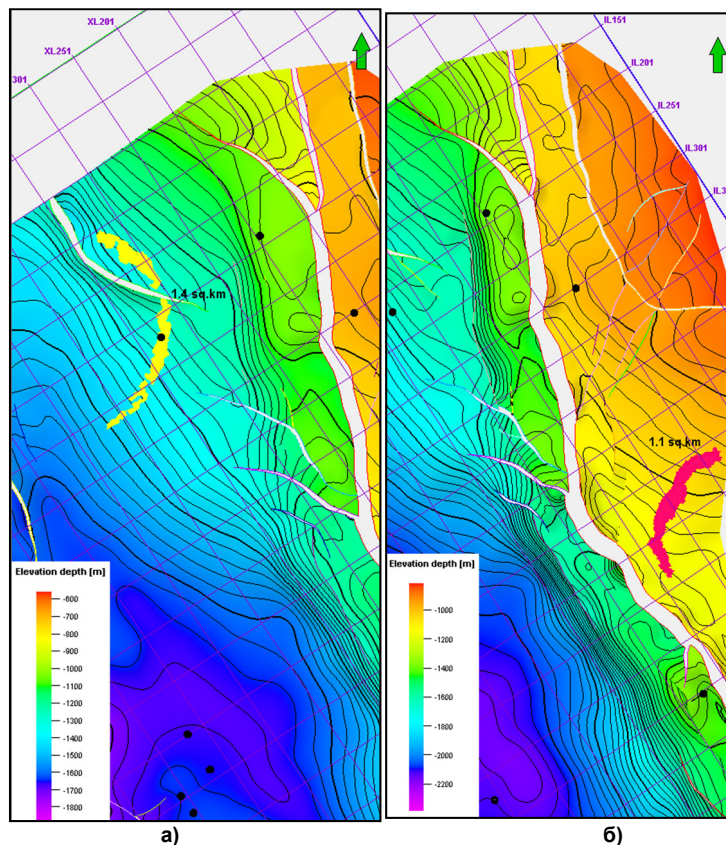


Рис. 3. Стародавні річкові долини, виявлені за допомогою технології geobody:

а) у відкладах московського ярусу середнього карбону; б) у відкладах башкирського ярусу середнього карбону

Таблиця 1

Характеристики класів AVO залежно від значень AVO атрибутів градієнта (G) та інтерсепта (I), де інтерсепту відповідає горизонтальна, а градієнту – вертикальна вісь на кросплоті

Клас	Відносний імпеданс	Квадрант на кросплоті	Інтерсепт	Градієнт
1	Пісковик з високим імпедансом	4	+	-
2 negative	Пісковик в умовах слабкої контрастності імпедансів	3	-	-
2 positive	Пісковик в умовах слабкої контрастності імпедансів	4	+	-
3	Пісковик з низьким імпедансом	3	-	-
4	Пісковик з низьким імпедансом	2	-	+

Для першого класу AVO коефіцієнт відбиття, а разом з ним і інтерсепт, є позитивним для нульового віддалення. Коефіцієнт відбиття зменшується разом зі збільшенням віддалення між джерелами та приймачами. Зміна знаку коефіцієнта відбиття призводить до появи темних плям на сейсмічних зображеннях, побудованих за відповідними кутовими наборами трас сейсмограм спільних джерел.

Другий клас характеризується слабкою контрастністю імпедансу на межах розділу пластів та різними знаками інтерсепта. Низька контрастність імпедансу відповідає малим значенням інтерсепта. Для класу 2 negative зміна полярності відбитих хвиль відсутня через від'ємне значення інтерсепта та градієнта. А для класу 2

positive відбувається зміна полярності відбитих хвиль разом із збільшенням віддалення між джерелами та приймачами.

Третій клас AVO визначається низьким імпедансом, але високою контрастністю імпедансу на границях розділу пластів. Від'ємні значення інтерсепта та градієнта свідчать про збільшення інтенсивності відбитих хвиль разом із збільшенням віддалення між джерелами та приймачами. Водночас коефіцієнт відбиття зберігає від'ємний знак. Цей клас AVO асоціюється з класичними аномаліями коефіцієнтів відбиття з великими негативними значеннями або аномаліями типу яскравих плям.

Четвертий клас AVO, описаний у роботі (*Castagna and Swan, 1997*), відповідає пісковику із значними по

модулю негативними коефіцієнтами відбиття для нульових віддалень. Разом із збільшенням віддалень амплітуда відбитих хвиль слабо збільшується та зберігає від'ємний знак. Аномалії такого класу відповідають слабо консолідованим пісковицям, що залягають на невеликих глибинах, а також відносно м'яким пісковицям, що знаходяться між твердими гірськими породами, наприклад сланцями, алевролітами або карбонатами.

Класифікація геологічних тіл за допомогою AVO атрибутів не обмежується використанням кросплатів градієнта та інтерсепта. Це можуть бути також швидкості поздовжніх V_p та поперечних V_s хвиль тощо. Наприклад, класифікація за допомогою швидкостей V_p та V_s дозволяє вивчати властивості порових флюїдів та літологію (Foster et al., 1993; Verm and Hilterman, 1995; Foster et al., 1997; Castagna et al., 1998; Foster and Keys, 1999). У загальному випадку технологію AVO можна розглядати як окремий приклад об'ємної класифікації з використанням двох сейсмічних атрибутів. Отже, класифікація за допомогою декількох сейсмічних атрибутів є більш універсальною. Вона дозволяє прогнозувати набагато більше властивостей гірських порід порівняно з класифікацією на основі одного атрибуту.

Повертаючись до класифікації на основі AVO атрибутів інтерсепта та градієнта, розглянемо можливість виявлення за її допомогою геологічних тіл, перспективних на наявність вуглеводнів. Технологія об'ємної класифікації сейсмічних атрибутів geobody дозволяє вільно оперувати діапазонами зміни значень атрибутів. Для цього використовується двовимірна інтерактивна панель, на якій у графічний спосіб задаються області зміни значень атрибутів. У загальному випадку конфігурація областей зміни значень атрибутів може мати довільну форму. Гнучкий підхід до вибору областей зміни значень сейсмічних атрибутів дозволяє визначати нові класи аномалій AVO або уточнювати існуючі класи залежно від геологічних особливостей площі досліджень. Послідовність процедур об'ємної класифікації у цьому випадку виглядає

таким чином: завантаження в проект продуктивних свердловин, визначення продуктивних інтервалів та характеру насичення вуглеводнями, підбір областей зміни значень атрибутів, наприклад інтерсепта та градієнта, для досягнення збігу об'ємних геологічних тіл із зонами насичення гірських порід вуглеводнями, виділення нерозбурених геологічних тіл із заданими областями зміни значень сейсмічних атрибутів та достатніми для закладання нових свердловин ресурсами вуглеводнів.

На рис. 4 показано геологічне тіло, що виділено за допомогою атрибутів AVO інтерсепта та градієнта. Області можливих значень атрибутів показані у правій частині рисунку. Вони визначені шляхом ітерацій за критерієм максимальних розмірів та суцільної будови геологічних тіл. Априорними даними для початку ітераційного процесу було припущення про наявність у геологічному середовищі пісковиць з низьким та середнім імпедансом, які належать до другого та четвертого класів. Третій клас у даному випадку не розглядався у зв'язку з тим, що йому відповідають аномалії типу яскравих плям. Такі аномалії надійно виявляються шляхом класифікації за одним атрибутом. Приклади виявлення аномалій типу яскравих плям розглянуті вище.

Геологічне тіло, показане на рис. 4, відповідає відкладам московського ярусу середнього карбону. Його об'єм становить 85 млн м^3 газу. Свердловини (рис. 4), що пробурені на розкриття цього об'єкта, підтвердили наявність у ньому промислових запасів природного газу.

Описаний вище підхід було застосовано для виділення геологічного тіла, показаного на рис. 5. Воно відповідає відкладам башкирського ярусу середнього карбону. Свердловини, пробурені на розкриття цього об'єкта, підтвердили наявність у ньому природного газу, запаси якого також оцінюються як промислові.

Розглянуті літологічні пастки вуглеводнів (геологічні тіла) були виділені за допомогою відповідного вибору діапазонів зміни значень тривимірних масивів інтерсепта та градієнта на двовимірних областях визначення цих AVO атрибутів, що також показані на рис. 4 та 5 відповідно.

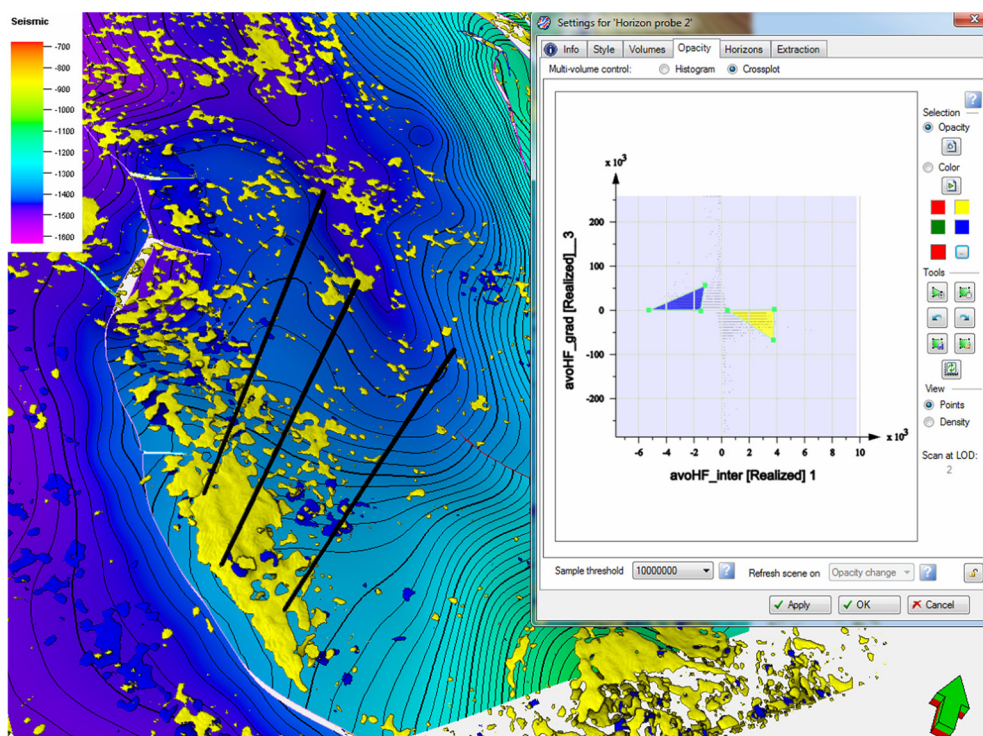


Рис. 4. Геологічне тіло у відкладах московського ярусу середнього карбону, що виявлено за допомогою технології geobody з використанням атрибутів інтерсепта та градієнта

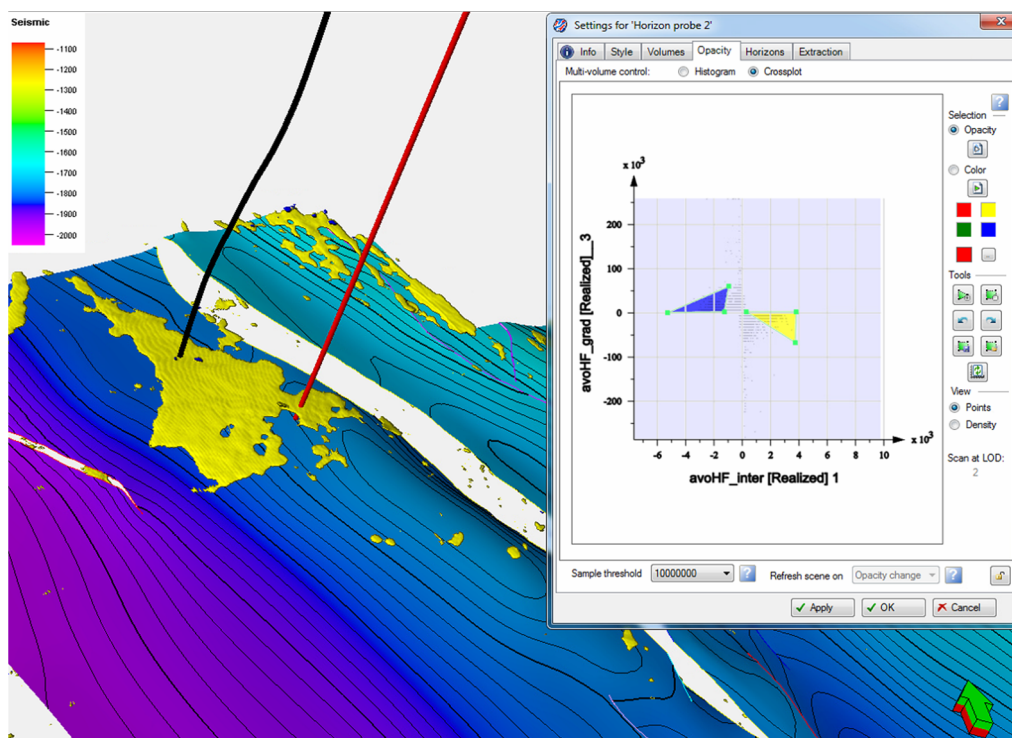


Рис. 5. Геологічне тіло у відкладах башкирського ярусу середнього карбону, що виявлено за допомогою технології geobody з використанням атрибутів інтерсепта та градієнта

Висновки. У роботі показано, що об'ємна комп'ютерна класифікація геологічних тіл за сейсмічними атрибутами є ефективним інструментом виявлення пасток вуглеводнів літологічного характеру. Така класифікація дозволяє отримати принципово нові результати під час аналізу тривимірних сейсмічних даних. Використання технології geobody, що реалізована у комп'ютерній платформі Petrel, дозволила впевнено визначити конфігурацію та положення перспективних на наявність вуглеводнів піщаних відкладів стародавніх річок. Буріння свердловин підтвердило наявність природного газу у цих відкладах. Традиційні підходи до виявлення та інтерпретації таких об'єктів на площі досліджень не дали позитивних результатів.

Класифікація за одним або декількома сейсмічними атрибутами дозволила узагальнити та систематизувати погляди на такі відомі технології інтерпретації сейсмічних атрибутів, як технологія "яскравої плями" та аналіз AVO. У цьому плані метод яскравої плями є прикладом класифікації за одним, а AVO аналіз – за декількома сейсмічними атрибутами. Алгоритм класифікації геологічних тіл за сейсмічними атрибутами та його комп'ютерну реалізацію geobody доцільно використовувати як для виявлення літологічних пасток вуглеводнів, так і для уточнення результатів традиційної інтерпретації тривимірних сейсмічних даних.

Наведено також результати виявлення літологічних пасток вуглеводнів на площах та родовищах сходу України за допомогою їх класифікації за одним та двома сейсмічними атрибутами. Знайдені геологічні тіла приурочені до відкладів московського та башкирського ярусів середнього карбону. Результати буріння свердловин підтвердили наявність природного газу у виявлених літологічних пастках.

Список використаних джерел

- Вижва, С.А., Соловйов, І.В., Круглик, В.М., Лісний, Г.Д. (2018). Прогнозування зон підвищеної пористості у глинистих породах Сходу України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 80, 28–33.
- Castagna, J. P., Swan, H. W. (1997). Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 337–342.

Castagna, J. P., Swan, H. W., Foster, D. J. (1998). Framework for AVO gradient and intercept interpretation. *Geophysics*, 63, 948–956.

Chopra, S., Castagna, J.P. (2014). *AVO. SEG, Investigation in Geophysics Series*, 16, 288.

Deutsch, C.V. (1998). Fortran programs for calculating connectivity of three dimensional numerical models and for ranking multiple realizations. *Computers & Geosciences*, 24, 69.

Forrest, M., Roden, R., Holeywell, R. (2010). Risking seismic amplitude anomaly prospects based on database trends. *The Leading Edge*, 5, 936–940.

Foster, D.J., Smith, S.W., Dey-Sarkar, S., Swan, H.W. (1993). A closer look at hydrocarbon indicators. *63 Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 731–733.

Foster, D.J., Keys, R.G., Reilly, J.M. (1997). Another perspective on AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 1233–1237.

Foster, D.J., Keys, R.G. (1999). Interpreting AVO responses. *69 Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 748–751.

Hoshen, J., Kopelman, R. (1976). Percolation and cluster distribution. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm. *Physical Review*, 14, 3438–3445.

Roden, R., Chen, C.W. (2017). Interpretation of DHI characteristics with machine learning. *First Break*, 35, 55–63.

Rudolph, K.W., Goulding, F.J. (2017). Benchmarking exploration predictions and performance using 20+ yr of drilling results: One company's experience. *AAPG Bulletin*, 101, 161–176.

Rutherford, S.R., Williams, R. H. (1989). Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*, 54, 680–688.

Velve, L.M., Scordstad, A., Vonnet, J. (2018). Recent developments in object modelling opens new era for characterization of fluvial reservoirs. *First Break*, 36, 85–89.

Verm, R., Hilterman, F. (1995). Lithology color-coded seismic sections: The calibration of AVO crossplotting to 280 AVO rock properties. *The Leading Edge*, 14, 847–853.

References

Castagna, J. P., Swan, H. W. (1997). Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 337–342.

Castagna, J. P., Swan, H. W., Foster, D. J. (1998). Framework for AVO gradient and intercept interpretation. *Geophysics*, 63, 948–956.

Chopra, S., Castagna, J.P. (2014). *AVO. SEG, Investigation in Geophysics Series*, 16, 288.

Deutsch, C.V. (1998). Fortran programs for calculating connectivity of three dimensional numerical models and for ranking multiple realizations. *Computers & Geosciences*, 24, 69.

Forrest, M., Roden, R., Holeywell, R. (2010). Risking seismic amplitude anomaly prospects based on database trends. *The Leading Edge*, 5, 936–940.

Foster, D.J., Keys, R.G. (1999). Interpreting AVO responses. *69 Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 748–751.

Foster, D.J., Keys, R.G., Reilly, J.M. (1997). Another perspective on AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 1233–1237.

Foster, D.J., Smith, S.W., Dey-Sarkar, S., Swan, H.W. (1993). A closer look at hydrocarbon indicators. 63 *Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 731–733.

Hoshen, J., Kopelman, R. (1976). Percolation and cluster distribution. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm. *Physical Review*, 14, 3438–3445.

Roden, R., Chen, C.W. (2017). Interpretation of DHI characteristics with machine learning. *First Break*, 35, 55–63.

Rudolph, K.W., Goulding, F.J. (2017). Benchmarking exploration predictions and performance using 20+ yr of drilling results: One company's experience. *AAPG Bulletin*, 101, 161–176.

Rutherford, S.R., Williams, R. H. (1989). Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*, 54, 680–688.

Velve, L.M., Scordstad, A., Vonnet, J. (2018). Recent developments in object modelling opens new era for characterization of fluvial reservoirs. *First Break*, 36, 85–89.

Verm, R., Hiltebert, F. (1995). Lithology color-coded seismic sections: The calibration of AVO crossplotting to 280 AVO rock properties. *The Leading Edge*, 14, 847–853.

Vyzhva, S.A., Solovyov, I.V., Kruhlyk, V.M., Lisny, G.D. (2018). Prediction of high porosity zones in clay rocks at the Eastern Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80, 28–33. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 14.11.18

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vsa@univ.kiev.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine
I. Solovyov, Director general,
E-mail: i.solovyov@geounit.com.ua
V. Kruhlyk, Senior Geologist,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com,
G. Lisny, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof., Deputy Director general,
E-mail: g.lisny@geounit.com.ua,
Geounit LLC, 9 Stepana Banderi Ave., Kyiv, 04073, Ukraine

USE OF THE TECHNOLOGY OF INTERACTIVE CLASSIFICATION OF GEOLOGICAL BODIES FOR GAS DEPOSITS FORECASTING IN EASTERN UKRAINE

The possibilities of allocation of geological bodies with certain physical and filtration-capacitive properties on the basis of classification by a set of seismic attributes are considered. This classification is based on the use of computer technology with parallel computing on graphic processors. High-speed parallel computing provides the ability to interactively classify and get results in real-time. At the same time, application of graphic processors allows to realize technologies of interactive classification not only on computing clusters, but also on personal computers.

Geological efficiency of technologies of interactive classification is shown. Their application allows to detect geological bodies with certain physical properties on the basis of computer analysis of three-dimensional arrays of seismic data, in particular seismic images and arrays of seismic attributes. It is important to note that computer technologies of the interactive classification of three-dimensional seismic data not only provide a high speed of determination of the spatial position and properties of geological bodies, but also allow to realize the fundamental possibility of such a definition. Traditional approaches to the identification and classification of geological bodies are based on a sequential analysis of sections of three-dimensional seismic data. In this case, the solution of the problem of the identification and classification of geological bodies often encounter the fundamental problems due to the complexity of the visual assessment of three-dimensional geological objects based on the analysis of the sequence of two-dimensional sections of the arrays of seismic data.

The authors propose a convenient approach to systematizing methods of interactive classification of geological bodies by one and several seismic attributes. The known technologies of bright spots and AVO are considered as elements of a sequence of methods of interactive classification using different numbers of seismic attributes.

According to the results of 3-D seismic survey carried out on the areas of the east of Ukraine, the classification of geological bodies using one and two seismic attributes was performed. Some objects with perspectives concerning presence of hydrocarbon were found and analyzed. The conclusion of classification expediency using several parameters is done. It creates preconditions for realization of more perfect and versatile approaches to the detection of geological bodies with given physical properties.

Keywords: seismic image, seismic inversion, interactive classification, seismic attributes, geobody, direct indicators of hydrocarbons.

С. Выхва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.kiev.ua,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, г. Київ, 03022, Україна
І. Солов'єв, ген. директор,
E-mail: i.solovyov@geounit.com.ua
В. Круглик, вед. геолог,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com
Г. Лесной, д-р геол. наук, доц., зам. ген. директора,
E-mail: g.lisny@geounit.com.ua
ООО "ГЕОЮНИТ", пр. С. Бандері, 9, г. Київ, 04073, Україна

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРАКТИВНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ ГАЗА НА ВОСТОКЕ УКРАИНЫ

Рассмотрены возможности выделения геологических тел с определенными физическими и фильтрационно-емкостными свойствами на основе классификации по набору сейсмических атрибутов. Такая классификация базируется на использовании компьютерных технологий с параллельными вычислениями на графических процессорах. Высокая скорость параллельных вычислений обеспечивает возможность интерактивной классификации и получения результатов практически в реальном времени. В то же время использование графических процессоров позволяет реализовать технологии интерактивной классификации не только на вычислительных кластерах, но и на персональных компьютерах.

Показана геологическая эффективность технологий интерактивной классификации. Их использование позволяет выявлять геологические тела с определенными физическими свойствами на основе компьютерного анализа трехмерных массивов сейсмических данных, в том числе сейсмических изображений и массивов сейсмических атрибутов. Важно отметить, что компьютерные технологии интерактивной классификации трехмерных сейсмических данных не только обеспечивают высокую скорость определения пространственного положения и свойств геологических тел, но и позволяют реализовать принципиальную возможность такого определения. Традиционные подходы к выделению и классификации геологических тел базируются на последовательном анализе разрезов трехмерных сейсмических данных. В этом случае решение задачи выделения и классификации геологических тел часто сталкивается с принципиальными проблемами в связи со сложностью визуальной оценки трехмерных геологических объектов на основе анализа последовательности двухмерных разрезов массивов сейсмических данных.

Авторами предложен удобный подход к систематизации способов интерактивной классификации геологических тел по одному и нескольким сейсмическим атрибутам. Известные технологии яркого пятна и AVO рассматриваются как элементы последовательности способов интерактивной классификации с использованием различного количества сейсмических атрибутов.

По данным объемной сейсморазведки, проведенной на площадях востока Украины, выполнена классификация геологических тел по одному и двум сейсмическим атрибутам. Найдены и проанализированы объекты, перспективные в отношении содержания углеводородов. Сделан вывод о целесообразности классификации по нескольким параметрам, что создает предпосылки для реализации более совершенных и разносторонних подходов к выделению геологических тел с заданными физическими свойствами.

Ключевые слова: сейсмическое изображение, сейсмическая инверсия, интерактивная классификация, сейсмические атрибуты, прямые индикаторы углеводородов.

УДК 528.48

T. Malik, Cand. Sci. (Techn.), Assoc. Prof.,
E-mail: malik.tat@gmail.com
Private Institution of Higher Education University of emerging technologies,
28 Mashynobudivnyi Lane, Kyiv, 03067, Ukraine
Ya. Bryk, Chief land surveyor,
E-mail: meas.group@gmail.com
"Solstroy" LTD, 1 B. Hmyri Str., Kyiv, 02140, Ukraine
V. Zatserkovnyi, Dr Sci. (Techn.), Assoc. Prof.,
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine
V. Belenok, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,
E-mail: belenok.vadim@gmail.com
National aviation university,
1 Komarova Ave., Kyiv, 03058, Ukraine

EVALUATION OF ENGINEERING STRUCTURES DEFORMATION (ACCURACY)

(Рекомендовано членами редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Іванік та д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвоюю)

The construction of the model of accuracy of the measuring processes of the automated monitoring system of engineering structures deformations from the point of the theory of accuracy is considered in the article. From the point of view of the generalization of the accuracy of measurements by the automated system of engineering structures monitoring, the construction of the model of the measuring process is considered, resulting in separate characteristics and properties of the object to be investigated. In this case these are values of deformations of engineering constructions' structures.

The brief acquaintance with the automated system of monitoring of engineering structures deformations, which represents a chain of optoelectronic devices-deformation marks, which are installed on constructions of structures and fix the created line is given. The use of this system allows to solve the problem of the preventive assessment of the dynamics of local technogenic deformation in the engineering structure and thus to increase the level of technogenic safety of the personnel of the engineering structure.

Compared with modern well-known methods and means for determining the engineering structures deformation, an automated deformation monitoring system has the following advantages:

1. Cross-section geodetic control of deformations (position) of elements of the full volume of engineering structure with increased accuracy.
2. Automated control of engineering structures deformations in real time, including in limited or inaccessible for visual measurements places.
3. Control of the technogenic safety of the engineering structure, prediction of the moment of the emergency, warning about the upcoming critical state (moment) of the engineering structure in real time with the accurate definition of a certain area.
4. Installation of the entire monitoring system occurs during the construction of the structure, pre-installation sites of optoelectronic devices - deformation marks are agreed with the designers and architects.
5. The mean square error of measurement of relative deviations of deformations is not less than $0,1 \div 0,5$ mm at distances between optoelectronic devices up to 10 m.
6. Information on the magnitude of deviations from the nominal (initial) position goes to the remote central control panel of the system in real time scale.
7. In the case of upcoming moment of dangerous deviation (deformation), the command from the main control panel receives a signal for rapid response with the accurate designation of the place of dangerous deformation.

Keywords: automatic control of deformations of engineering structures, deformation marks, monitoring of deformations of engineering structures.

Formulation of the problem. Modern construction and operation of engineering structures requires the development and dynamic introduction of an automated system for monitoring engineering structures that would measure deformations with increased accuracy and efficiency, would have access to monitoring structures in places not accessible to visual measurements, while all the information about deformation could be promptly received to a remote post for processing.

Analysis of recent research and publications. Modern well-known automated systems of monitoring of engineering structures deformations based on the combined use of modern geodetic instruments such as opto-electronic total stations, GPS and various sensors, etc., have significant disadvantages, which can include both the complexity of the design, and the lack of accuracy of the definition deformations, impossibility to observe the deformations of engineering structures in places unattainable by visual measurements. In addition, these devices and equipment have difficulties in fixing them to structures, high cost and lack of protection from vandalism.

Formulating the goals of the article. The purpose of the article is to construct a model of measuring process carried out by an automated system for monitoring the engineering structures deformation and obtaining values of deformations of engineering constructions' structures.

Presentation of the main research material. The task is solved by creating an automated system for monitoring

the deformation of engineering structures. The system consists of a chain of optoelectronic devices - deformation marks, which are installed on the structures of the construction and which fix the generated line.

On fig. 1. There is a block-diagram of created line of automated system of engineering structures monitoring (Silva et al., 2015; Malik, 2016) which includes:

- 1,2, ..., n-1, n – optoelectronic (OE) dual-channel devices automated system for monitoring the deformations;
 - LS1, LS2 – Insignia of the reference geodetic signs of the cavity;
 - 4 – lenses of monitoring system devices;
 - 5 – block of double photovoltaic matrices;
 - 6 – control block;
 - 7 – block of registration, transformation and processing the information;
 - 8 – indication block;
 - 9 – record and information maintenance unit;
 - 10 – block of assessment of the construction structure solidity;
 - 11 – block of subsidence monitoring ΔZ ;
 - 12 – block of monitoring of spatial network deformation $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$;
 - 13 – block of technogenic situation assessment;
 - 14 – signaling and alert block;
 - 15 – means of communication.
- Units 7-13 are laptop (or small computer or tablet).

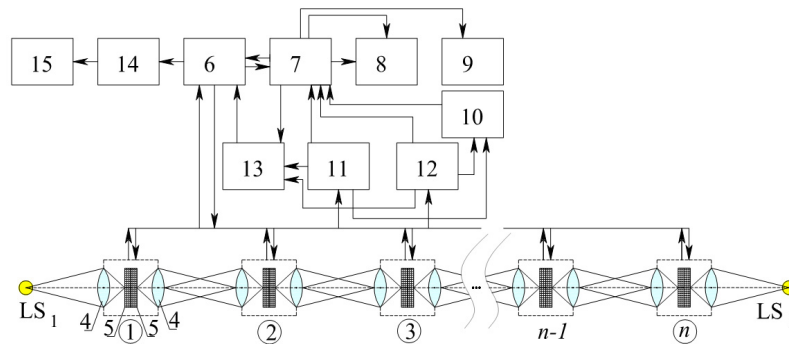


Fig. 1. Block diagram of an established line of automated system of monitoring of engineering structures deformation

The scheme of the most simple OE device – deformation mark (fig. 2), which is included into block-scheme of established automated line from fig. 1, that is blocks 1, 2, ..., n contain (Silva et al., 2015).

- 4 – lenses;
- matrices
- 5 – photodetection matrices;
- 16 – sighting mark in the form of light ring;

- 17 – light rays from sighting marks 16, which come through lenses 4 and appear on photodetection matrices;
- 18 – light rays coming from mark 16 into lenses of neighboring devices;
- 19 – body of OE device;
- 20 – bases of OE devices bodies;
- L-L' – established line.

A prototype of an opto-electronic dual-channel device – a strain mark is shown on fig. 3 (Malik, 2016).

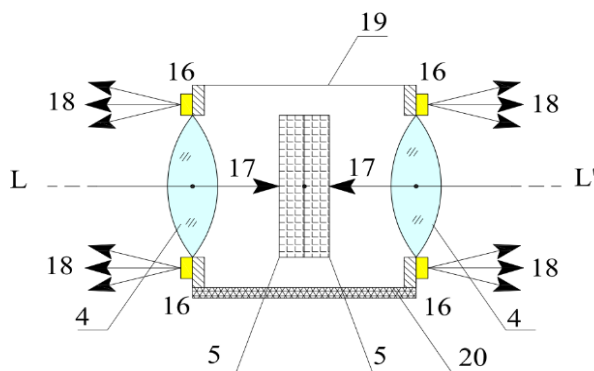


Fig. 2. Scheme of optoelectronic dual channel device-deformation mark

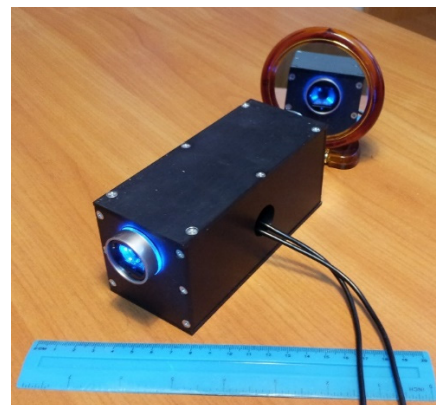


Fig. 3. A prototype of an opto-electronic dual-channel device – deformation mark

To measure the deviations of the optoelectronic device-deformation mark from the cavity it is necessary to measure the magnitude of the linear shift of the beam of light formed by the lens in the working plane of the photomatrix. In this case, the light streams from the visual marks fall on the lenses, which focus images of the marks (light rings around the lenses) on the targets of the photo matrices (Malik and Bryk, 2016).

The automated system for monitoring the deformations of engineering structures includes solving a set of tasks:

1. In-depth geodetic control of deformations (position) of elements of the full volume of structures with increased accuracy.
2. Automated control of deformations of engineering structures in real time, including limited or inaccessible places for visual measurements.
3. Control of technogenic safety of engineering structures, prediction of the moment of emergency, warning about the approach of the critical state (moment) of the engineering structure in real time with the accurate designation of a certain area.

In (Rosenberg, 1975) we consider the construction of models of measuring processes and systems from the standpoint of the theory of accuracy. From the point of view of generalization of accuracy of measurements by automated system of monitoring of engineering structures (Malik 2016).we consider the construction of the model of the

measuring process (as a result of which we obtain certain characteristics and properties of the object of study, in this case - the values of deformations of structures of engineering constructions.

The diagram (fig. 4), which shows the model of the measurement process, is indicated by:

D – a plurality of deformation marks, devices from the automated system of monitoring of engineering structures, fixed on the structures of engineering construction ($d \in D$);

M – mathematical models that describe a plurality of deformation marks ($m \in M$);

E – set of standards of working measures ($e \in E$);

d – deformation mark from the set D ($d \in D$);

IM_d – the main probabilistic mechanism that randomly selects a deformation mark d from a plurality D ,

$IM_{\tilde{d}}$ – an accidental mechanism for implementing the measurement process with certain sources of errors;

A_I – an operator that describes an ideal system that is error-free;

ρ – a criterion for evaluating the ideal system A_I ;

a_I – a theoretical model of an ideal measurement system that is free of errors;

A – operator of a real system;

a_{t-1} і a_t – the result of a comparison of the ideal and real measurement systems for the previous $t-1$ and current t cycles;

ρ' – a criterion for comparing ideal and real systems;

Z – impact of the environment, man-made factor;

C – technological influence on the system due to errors of assembly technology, errors of nodes and details of devices-deformation marks of the automated system of monitoring of engineering structures ;

σ – random error of determination of coordinates of deformation marks;

Δ – systematic error of determination of coordinates of deformation marks;

$\varepsilon_i = \sigma_i + \Delta_i$ – total error, consisting of random and systematic ($\varepsilon \in E$);

$(t-1)$ – previous cycle;

(t) – current cycle;

$\sigma_{\Delta t}$ – random error of the system, or error of measurement of deformation of deformation marks;

σ_{don} – acceptable value of random error;

A_n – operator of control (checking) of the real system;

S – block of storage and accumulation of statistical data;

Φ – filter of deformation results, block of determination of level (degree) of danger;

W – a block of decision making on the possibility of eliminating the causes of deformation of engineering structures;

O3 – block of alert about the rapid approximation of critical deformation and communication.

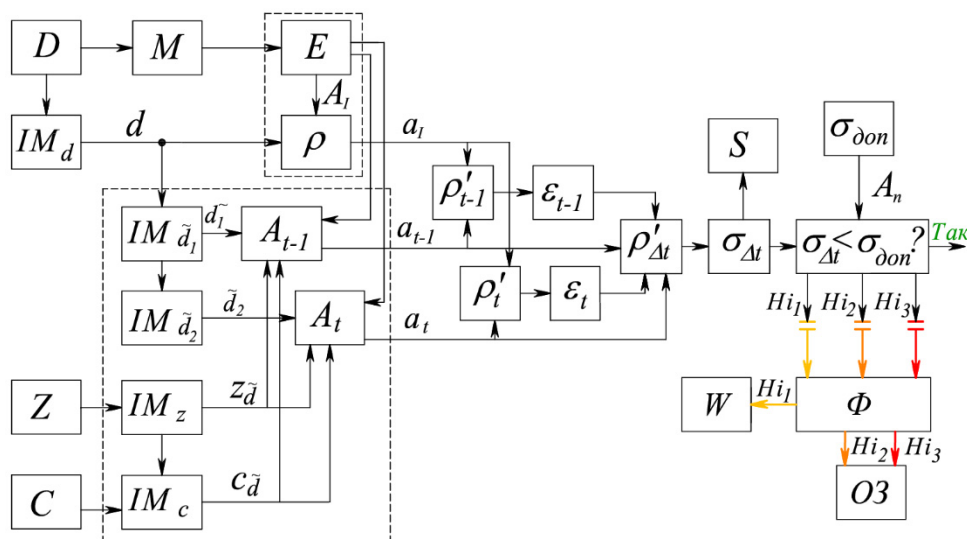


Fig. 4. Model of process of measurement of engineering structures monitoring by automated system

Let us consider the model of the measurement process of engineering structures by an automated monitoring system (fig. 4).

We have a plurality D of deformation marks d fixed on structures of an engineering construction, while $d \in D$, the thesaurus M includes a plurality of mathematical models $m \in M$ that describe a plurality of object-deformation marks included in D . Standards E represent a plurality of standards of working measures, which are set in the form of conditions and requirements for instruments for measuring deformations, norms for the construction of engineering constructions or from the experience of construction and exploitation of engineering structures ($e \in E$) (for example, the requirements for the characteristics of the matrix grid, lens, measuring blocks of optical-electronic automated system for monitoring deformations of engineering structures).

During the observation of engineering structures deformation, the model of the measurement process interacts with one, very specific, deformation mark d from a plurality of deformation marks D , while it is unknown with which of them, but which has changed its original position, which is subject to observation and research as a result. In this case, the choice of mark d is random and can be represented in the form of the action of some probabilistic mechanism IM_d , which randomly selects a certain deformation mark d from

a plurality D ($d \in D$). As a result, it is necessary to identify the deformation of the brand d with one of the standards with a certain value of the parameters, and from there - and with the specific model m^* included in M ($m^* \in M$), closest to d according to the comparison criterion ρ' , which can be represented as:

$$m^* = \arg \min_{m \in M} \rho'(d, m). \quad (1)$$

The ideal system is an ideal construction of an engineering construction with fixed deformation marks on it. The ideal system, which is described by the operator A_t , compares with the help of the operator ρ the deformation mark d with all the standards of the set E , with the result of measuring a_t the deformation of the mark d will be free of errors.

The real system with the operator A_p is a concrete design of the measuring system, which includes different equipment and which is influenced by various factors. In this case, the real system also includes a measure and a comparator, which is described by a model that takes into account the presence of various factors of influence.

The results of measurements are influenced by the factors:

1) the limited number and duration of monitoring data available for monitoring of the process of the deformation marks d , resulting in a specific measurement case model

of the measurement process works with individual implementations $\tilde{d}_1$, the emergence of which is controlled by a probabilistic mechanism $IM_{\tilde{d}_1}$ that determines the statistical nature of the measurement problem;

2) the action of the external environment Z , including the man-made factor, which affects the elements of the measuring system and changes in time unpredictably. Realizations $z_{\tilde{d}}$ are "chosen" by a probabilistic mechanism IM_z ;

3) the factor of technological influence C that affects the system due to errors in the assembly of optoelectronic devices, errors in the manufacture of nodes and parts of the automated system of monitoring engineering structures, or as a result of aging and depreciation of the system, is taken into account by the inclusion of the probabilistic mechanism IM_c .

In a real system, the results of measurements are affected by errors that can be interpreted as a result of comparison in accordance with some criterion ρ'_p , which is specified in the normative document or that is put into the system in advance and which depends on the purpose of measurement.

During multiple observations of engineering structures deformations, the parameters a_i of an ideal system remain unchanged, and indicators a_p of the real system change randomly due to the presence of random mechanisms $IM_{\tilde{d}}$, IM_z , IM_c which are sources of errors.

In the scheme of the model of the process of measurement (fig. 4), a real system of determining the coordinates of deformation marks, at least from two cycles $t-1$ and t respectively. The result of each measurement cycle in the real system changes due to the influence of various factors Z , C , and as a result, each result has a plurality of errors $\varepsilon \in E$, including random σ and systematic Δ , ($\varepsilon_i = \sigma_i + \Delta_i$), which can be described by the expressions:

$$\varepsilon_{t-1} = \arg \min_{\varepsilon_{t-1} \in E} \rho'_{t-1}(a_i, a_{t-1}), \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \arg \min_{\varepsilon_t \in E} \rho'_t(a_i, a_t). \quad (3)$$

According to the fact that the errors obey the normal distribution law, we compare the errors according to a certain criterion $\rho'_{\Delta t}$, taking into account the significance of the systematic error, we introduce an adjustment for its effect, we obtain from the two measurement cycles the amount of errors

$$\sigma_{\Delta t} = \sqrt{\sigma_{(t-1)}^2 + \sigma_{(t)}^2}, \quad (4)$$

which falls into the statistical block where data from all measurement cycles is accumulated. Acceptable level of quality of this system is regulated by the requirements and the value of the admission σ_{adm} . The control operator A_n carries out a comparison of the error $\sigma_{\Delta t}$ and its permissible value σ_{adm} and, based on the results of the processing of the deformation measurements, one assess the situation of the structure of the engineering structure, for example, based on three levels:

Level 1 - is a result close to the lower limit of tolerance, but still within tolerance;

Level 2 - is a result that exceeds the tolerance within certain limits - a signal to the notification block - steps must be taken to strengthen the construction;

Level 3 - is the result of a signal to the block of notification of the need to urgently take measures to evacuate people and values.

The value of the results from all three levels of situation assessment falls into the signaling and notification unit of the automated system of monitoring of engineering structures (block 14, fig. 1). In the case of the danger of the second and third levels, the information comes to the operational response units of the automated system of monitoring of engineering structures (block 15, fig. 1).

The main sources of errors in the automated system for monitoring the deformation of engineering structures one can include the overall mean square error (MSE) of deformation determination by the system, which includes:

Group Z errors – MSE for the influence of the environment, man-made factor;

Group C errors – technological MSE for the impact on the system due to errors in the assembly of devices, errors in the manufacture of nodes and parts of devices-deformation marks of the monitoring system.

Errors of group C: MSE inspection of device-deformation mark system (random); MSE visualization on the center of the light ring of the deformation mark of the device system (random); MSE due to inaccuracy of alignment of the focal length of the device's lens system (random); MSE definition of distances between devices of the system (random); MSE result due to accumulation of errors in the system (random); MSE as a result of instability of foundations (precipitation) under the reference marks (random); MSE information loss in electronic tract (random); MSE transmission of information on the electric channel (random); unpredictable mistakes.

Errors of group Z: MSE due to fluctuations in ambient temperature (random).

In the composition of errors of determination of the coordinates of deformation marks, all the components of the MSE are included, used to determine the deformations by devices of an automated deformation monitoring system.

Conclusions. As a result of construction of the model of the accuracy of the measurement process by automated system of monitoring of deformation of engineering structures we have the following:

1. Theoretical substantiation of the matrix image of the system of deformation measurements of structures of engineering constructions.

2. Recommendations on the choice of optimal control of the process of measuring deformations of engineering structures, which means such control which provides a minimum error in the presence of uncontrolled effects on the deformation of the structure.

3. Mathematical basis for research of an array of deformations of elements of an engineering structure.

Список використаних джерел

- Бурачек, В.Г., Малик, Т.Н., Лиховолов, О.В. (2015). Автоматизированная система точного геодезического контроля деформаций инженерных сооружений. *Проектирование развития региональной сети железных дорог: сб. науч. тр. под ред. В.С. Шварцфельда*. Хабаровск: ДВГУПС, 3, 86–98.
- Малик, Т.М., Бурачек, В.Г., Брик, Я. (2016). Метод автоматического геодезического суцільного контролю деформацій інженерних споруд. *Технічні науки та технології*, 1 (3), 145–151.
- Малик, Т.М. (2016). Геодезичний контроль деформацій інженерних споруд методом подвійного фотоелектричного ланцюга: дис. ... канд. техн. наук: 05.24.01. *Геодезія, фотограмметрія та картографія*. Київський національний університет будівництва і архітектури, К.
- Малик, Т.М., Брик, Я.П. (2016). Нова концепція вбудованого автоматизованого інженерно-геодезичного контролю деформацій конструкцій інженерних споруд. *Новітні технології*, 1 (1), 20–25.
- Бурачек, В.Г., Малик, Т.М. (2015). Спосіб автоматичного тотального геодезичного контролю деформацій інженерних споруд. *Патент України на винахід № 115261, МПК (2017.01) G01C 11/00 G02B 13/00, опубл. 10.10.2017, бюл. № 19/2017*.
- Розенберг, В.Я. (1975). Введение в теорию точности измерительных систем. М.: Сов. радио.

References

- Bryk, Y.P., Burachek, V.H., Malik, T.M. (2017). Type of automated total geodetic control of deformations of engineering constructions. *Ukrainian patent on invention № 115261, MPK (2017.01) G01C 11/00 G02B 13/00, issued on 10.10.2017, bulletin № 19/2017*. [in Ukrainian]
- Burachek, V.H., Malik, T.N., Lykholov, O.V. (2015). Automated system of accurate geodetic control of deformations of engineering constructions. In *Engineering of regional chain of railways: collection of scientific works by edc. V.S. Shvartsfeld*. Khabarovsk: Far Eastern State Railways University, 3, 86-98. [in Russian]
- Malik, T., Burachek, Y., Bryk, M. (2016). Method of automated geodetic total control of deformations of engineering structures constructions. *Technical sciences and technologies*, 1 (3), 145-151. [in Ukrainian]

- Malik, T.M. (2016). Geodetic control of deformations of engineering construction with method of double photoelectric chain. *Dissertation ... doctor of science: 05.24.01. Geodesy, photogrammetry and cartography*. Kyiv national university of building and architecture, Kyiv. [in Ukrainian]
- Malik, T.M., Bryk, Y.P. (2016). New concept of build-in automated engineering-geodesic control of deformations of structures of engineering constructions. *New technologies*, 1 (1), 20-25. [in Ukrainian]
- Rosenberg, V.Y. (1975). Introduction into theory of accuracy of measuring systems. Moscow: Soviet radio. [in Russian]

Надійшла до редколегії 21.10.18

Т. Малик, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: malik.tat@gmail.com
ПВНЗ Університет новітніх технологій,
пров. Машинобудівний, 28, м. Київ, 03067, Україна,
Я. Брик, головний геодезист, E-mail: meas.group@gmail.com
ТОВ "Солстрой", вул. Б. Гмири, 1В, м. Київ, 02140, Україна
В. Зацерковний, д-р техн. наук, доц.,
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна
В. Беленок, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: belenok.vadim@gmail.com
Національний авіаційний університет, Пр. Комарова, 1, м. Київ, 03058, Україна

ПОБУДОВА МОДЕЛІ ТОЧНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

Розглянуто побудову моделі точності вимірювальних процесів автоматизованої системи моніторингу деформацій інженерних споруд з позиції теорії точності. З погляду узагальнення точності вимірювань автоматизованою системою моніторингу інженерних споруд, розглянуто побудову моделі вимірювального процесу, в результаті чого отримано окремі характеристики і властивості об'єкта, що підлягає дослідженню, у даному випадку це величини деформацій конструкцій інженерної споруди. Наведено коротке ознайомлення з автоматизованою системою моніторингу деформацій інженерних споруд, яка являє собою ланцюг оптико-електронних приладів – деформаційних марок, що встановлюються на конструкціях споруди і фіксують створену лінію. Використання даної системи дозволяє вирішити завдання попереджувальної оцінки динаміки локальної техногенної деформації в інженерній споруді і тим самим підвищити рівень техногенної безпеки персоналу інженерної споруди.

Порівняно із сучасними загальновідомими методами і засобами визначення деформацій інженерних споруд, автоматизована система моніторингу деформацій має такі переваги:

1. Наскрізний геодезичний контроль деформацій (положення) елементів повного об'єму інженерної споруди з підвищеною точністю.
2. Автоматизований контроль деформацій інженерних споруд у режимі реального часу, в тому числі в обмежених або недосяжних для візуальних вимірювань місцях.
3. Контроль техногенної безпеки інженерної споруди, передбачення моменту аварійної ситуації, попередження про наближення критично небезпечного стану (моменту) інженерної споруди у реальному масштабі часу з точним позначенням певної ділянки.
4. Монтаж всієї системи моніторингу відбувається під час будівництва споруди, попередньо місця кріплення оптико-електронних приладів – деформаційних марок погоджуються з проєктантами і архітекторами.
5. Середньоквадратична похибка вимірювання відносних відхилень деформацій не гірше $0,1 \div 0,5$ мм при відстанях між оптико-електронними приладами до 10 м.
6. Інформація про величини відхилень від номінального (початкового) положення надходить на віддалений центральний пульт системи у реальному масштабі часу.
7. У випадку наближення моменту небезпечного відхилення (деформації) по команді з головного пульта управління надходить сигнал для швидкого реагування з точним позначенням місця небезпечної деформації.

Ключові слова: автоматичний контроль деформацій інженерних споруд, деформаційні марки, моніторинг деформацій інженерних споруд.

Т. Малик, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: malik.tat@gmail.com
ЧВУЗ Університет новітніх технологій,
пер. Машиностроительный, 28, г. Киев, 03067, Украина
Я. Брик, главный геодезист,
E-mail: meas.group@gmail.com
ООО "Солстрой", ул. Б. Гмири, 1В, г. Киев, 02140, Украина
В. Зацерковный, д-р техн. наук, доц.,
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина
В. Беленок, канд. физ.-мат. наук, доц.,
E-mail: belenok.vadim@gmail.com
Национальный авиационный университет, пр. Комарова, 1, г. Киев, 03058, Украина

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ТОЧНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрено построение модели точности измерительных процессов автоматизированной системы мониторинга деформаций инженерных сооружений с позиции теории точности. С точки зрения обобщения точности измерений автоматизированной системой мониторинга инженерных сооружений, рассмотрено построение модели измерительного процесса, в результате чего получены отдельные характеристики и свойства исследуемого объекта, в данном случае это величины деформаций конструкций инженерного сооружения. Автоматизированная система мониторинга деформаций инженерных сооружений представляет собой цепь оптико-электронных приборов – деформационных марок, установленных на конструкциях сооружений и фиксирующих створную линию. Использование данной системы позволяет решить задачу предупреждающей оценки динамики локальной техногенной деформации в инженерном сооружении и, тем самым, повысить уровень техногенной безопасности персонала в инженерном сооружении.

По сравнению с современными общеизвестными методами и средствами определения и измерения деформаций инженерных сооружений, автоматизированная система мониторинга деформаций обладает следующими преимуществами:

1. Сквозной геодезический контроль деформаций (положения) элементов полного объема инженерного сооружения с повышенной точностью.

2. Автоматизированный контроль деформаций инженерных сооружений в режиме реального времени, в том числе в ограниченных или недоступных для визуальных измерений местах.

3. Контроль техногенной безопасности инженерного сооружения, предвидение момента аварийной ситуации, предупреждение про приближение критически опасного момента инженерного сооружения в реальном масштабе времени с точным определением участка.

4. Монтаж всей системы мониторинга происходит во время строительства сооружения, предварительно места закрепления оптико-электронных устройств – деформационных марок утверждаются с проектантами и архитекторами.

5. Среднеквадратическая ошибка измерения относительных отклонений деформаций не превышает $0,1 \div 0,5$ мм при расстояниях между оптико-электронными устройствами до 10 м.

6. Информация о величинах отклонений от номинального (начального) положения поступает на отдаленный центральный пульт системы в реальном масштабе времени.

7. В случае приближения момента опасного отклонения (деформации) по команде с главного пульта управления поступает сигнал быстрого реагирования с точным уточнением места.

Ключевые слова: автоматический контроль деформаций инженерных сооружений, деформационные марки, мониторинг деформаций инженерных сооружений.

УДК 550.312

І. Віршило, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: ivirshylo@gmail.com

І. Пап, асп.,

E-mail: papiryna@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ІНТЕГРОВАНЕ СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ МІНЕРАЛОГІЧНОГО СКЛАДУ ЗЕМНОЇ КОРИ

(Рекомендовано членами редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Б.П. Масловим та д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)

Розглянуто побудову нового алгоритму просторового моделювання речовинного складу гірських порід, що узгоджується з результатами геофізичних, петрофізичних та геохімічних досліджень. Як вхідні параметри моделі використовуються розподіли імовірності величин, що моделюються, – об'ємні концентрації породотвірних мінералів і пустотного простору та параметри термонапруженого стану середовища – тиск і температура. Визначення розподілів імовірності здійснюється шляхом статистичної обробки результатів геологічних та геохімічних досліджень для речовинного складу та введенням довірчих інтервалів для результатів геофізичних досліджень. Як розрахункові алгоритми для задач сейсмоакустики, термометрії, магнітометрії та електрометрії використовується метод умовних моментних функцій. В основі алгоритму лежить багатокомпонентна матрична модель середовища з еліпсоїдальними включеннями, яка не має обмежень на концентрацію компонентів та дозволяє враховувати довільну симетрію середовища. Результатом моделювання є статистично значуща сукупність розв'язків, які мають геологічний зміст, що обмежується розподілами імовірності концентрацій породотвірних мінералів.

Ключові слова: глибинне сейсмічне зондування, сейсмо-мінералогічні моделі, методи глобальної оптимізації, стохастичні методи, пряма задача сейсмоакустики, метод Монте-Карло, метод умовних моментних функцій.

Вступ. Дослідження глибинної будови земної кори здійснюються багатьма геофізичними методами, серед яких, з 70–80-х років ХХ ст., провідне місце посів метод глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ) (Ризниченко, 2016). У той час велось активне вивчення Балтійського щита. Дані ГСЗ, отримані за участю І.П. Космінської на профілях ФЕННОЛОРА, ПОЛЯР, БАЛТИК, СВЕКА, згодом стали основою для великомасштабних міжнародних сейсмологічних проєктів SVEKALAPKO і POLARNET на Балтійському щиті (Косминская и Давыдова, 1980; Janiketal, 2009; FENNIA Working Group, 1998; Grad and Luosto, 1994; Luosto, 1989).

Питанням інтерпретації результатів ГСЗ у контексті визначення мінерального складу кори, починаючи з кінця 80-х років, почали цікавитися W. Mooney разом із N. Christensen. Їх робота дала уявлення про структуру континентальної кори на основі вивчення сейсмічної рефракції на профілях та визначення складу земної кори залежно від глибини, на основі порівняння цих результатів з лабораторними вимірами швидкості в умовах високих тисків для широкого діапазону порід, типових для земної кори (Christensen and Mooney, 1995).

Особливу увагу завоювало застосування ГСЗ при визначенні мінерального складу земної кори. З плином часу уявлення про склад земної кори змінювалися, буріння надглибоких свердловин стало найвагомішим фактором у формуванні сучасних сейсмічних моделей. Розширився погляд на чинники, які впливають на сейсмічні хвилі, зокрема було помічено, що не тільки хімічний склад, а й внутрішня структура та фізичний стан породи мають значення (Шаров, 2012). Отримання несхожих результатів у різних авторів часто пов'язане з використанням невідповідних до природи зареєстрованих хвиль методів кількісної інтерпретації. Найбільш масштабні дослідження методом ГСЗ проводилися на територіях Українського, Балтійського (Фенноскандинавського) та Канадського щитів (Соллогуб, 1986; Трипольський та Шаров, 2004; Grad and Tripolsky, 1994; 1995; Соллогуб та ін., 1978).

Метою дослідження є побудова нового алгоритму просторового моделювання речовинного складу гірських порід, що узгоджується з результатами геофізичних, петрофізичних та геохімічних досліджень. В основі застосованого підходу лежить розвиток ідей геофізичної томографії, запропонованих С. Вижвою, Г. Продайвою (Вижва та ін., 2010; 2013). Базовими геофізичними

методами, що використовуються для розв'язання комплексної задачі інверсії є глибинне сейсмічне зондування та гравіметрія (Продайвода та Гришук, 2007; Старостенко та Шванцара, 1994; Старостенко та ін., 1988). Також можуть бути залучені методи вивчення теплового поля Землі, магнітометрія та електрометрія (Продайвода та ін., 2012). Сумісність моделювання різних петрофізичних характеристик гірських порід досягається використанням універсальної багатокомпонентної анізотропної моделі середовища, що запропонована Г.Т. Продайвою зі співавторами (Prodaivoda et al., 2000; Маслов та Продайвода, 1998; Продайвода та ін., 2003).

Геологічне середовище уявляється у вигляді стохастичної моделі суміші породотвірних мінералів у макроскопічному об'ємі, що набагато перевищує характерний розмір зерен мінералів. Для задач прогнозування складу земної кори такий розмір буде визначатися просторовою розрізненістю глибинного сейсмічного зондування (порядок перших кілометрів). Вважається, що окремі включення не дотикаються один до одного, їх форма описується двох або трьохвісним еліпсоїдом, а орієнтація задається за допомогою функції розподілу орієнтації. Сукупність включень однакового складу та форми вважається *компонентом* моделі. За рівномірного розподілу включень по об'єму комірки, що моделюється, можна використовувати статистичне усереднення за компонентами. Розмір об'єму комірки, для якої здійснюється осереднення властивостей середовища, має набагато перевищувати характерні розміри структурних елементів. Слід зауважити, що автори у цьому дослідженні не оперують розмірами елементів і, таким чином, у задачі сейсмоакустики обмежуються лише кінематичними параметрами.

На відміну від методів інверсії, що дозволяють отримати один із незліченної кількості розв'язків оберненої задачі (Нолета, 1990; Mahdavi-Amiri and Bartels, 1989; Lines et al., 1988; Банди, 1988), автори у даному дослідженні притримуються стохастичного підходу (Банди, 1988; Евтушенко та ін., 2009), що дозволяє отримати всю множину розв'язків, які не суперечать спостереженим даним у межах визначеного довірчого інтервалу. Вибір остаточного розв'язку здійснюється за критеріями найбільшої імовірності. Такий підхід дозволяє оцінити довірчі межі отриманих результатів. Стохастичне моделювання для задач глибинного сейсмічного зондування

і визначення потенційного речовинного складу було здійснено при інтерпретації результатів глибинних досліджень у Фенноскандії (Silvennoinen et al., 2007).

Як вхідні параметри моделі використовуються розподіли ймовірності величин, що моделюються: у першу чергу, об'ємні концентрації породотвірних мінералів та пустотного простору; у другу – параметри термонапруженого стану середовища – тиск і температура. Визначення розподілів ймовірності здійснюється шляхом статистичної обробки результатів геологічних та геохімічних досліджень для речовинного складу та введенням довірчих інтервалів для результатів геофізичних досліджень. Це дає головну перевагу відносно класичних методів інверсії з оптимізацією – уникнення можливості отримання геологічно беззмисливих розв'язків. Алгоритм не накладає жодних обмежень на характер розподілу величин. При моделюванні можуть бути використані одномодальні гаусівський або логнормальний розподіли, трикутні або прямокутні розподіли, полімодальні розподіли тощо.

Алгоритм моделювання. Узагальнений алгоритм моделювання базується на генерації великої кількості реалізацій вектору мінералогічного складу в межах кожної комірки моделі $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}_k$, де c_i – об'ємні концентрації компонентів моделі; k – індекс комірки моделі; n – кількість компонентів моделі. Генерація значень концентрацій здійснюється у межах $[0, 1]$ методом Монте-Карло згідно з неперервними розподілами ймовірності. Зважаючи на обмеження $\sum_{i=1}^n c_i = 1$, один із компонентів визначається як $c_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} c_i$. Для кожної згенерованої реалізації розв'язується пряма задача сейсмоакустики, що дозволяє визначити модуль об'ємного стискування, модуль зсуву, густину, фазові швидкості повздовжньої та поперечної хвилі. Ці параметри додають до вектора реалізації $\{c_1, c_2, \dots, c_n, K_k, G_k, \rho_k, V_{Pk}, V_{Sk}\}_k$. Залежно від наявних даних здійснюється порівняння розрахованих швидкостей пружних хвиль зі спостереженими за одним із критеріїв найменших квадратів:

$$\varepsilon_P \leq (V_P^{\text{спост.}} - V_P^{\text{розн.}})^2 \quad (1)$$

або

$$\varepsilon_{PS} \leq w_1 (V_P^{\text{спост.}} - V_P^{\text{розн.}})^2 + w_2 (V_S^{\text{спост.}} - V_S^{\text{розн.}})^2, \quad (2)$$

де w_1, w_2 – деякі вагові коефіцієнти; ε – нев'язка даних.

Вектори, що задовольняють істинність обраного критерію, формують списки "коректних розв'язків" для кожної комірки моделі. Довжина списків може варіюватися від комірки до комірки. На наступному етапі моделювання для розв'язання прямої задачі гравіметрії обирають випадковим чином – один вектор із списку "коректних розв'язків" для кожної комірки моделі. Ця матриця розмірністю $(n+5, M)$, де M – кількість комірок моделі, використовується для розрахунку аномалії сили тяжіння на векторі точок спостереження гравітаційного поля. Реалізації, що задовольняють критерій:

$$\varepsilon_g \leq \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (\Delta g_{aq}^{\text{спост.}} - \Delta g_{aq}^{\text{розн.}})^2, \quad (3)$$

де Q – кількість точок спостереження гравітаційного поля, формують множину коректних розв'язків, що узгоджені одночасно з даними глибинного сейсмічного зондування та гравіметрії. Алгоритм може бути розширений за подібною ж логікою для використання теплового поля Землі, даних магнітометрії, електрометрії тощо. Кожен наступний метод має призводити до скорочення списків "коректних реалізацій" у коірках i , відповідно, звукувати область можливих розв'язків оберненої задачі для комплексу геофізичних методів (рис. 1.).

Остаточний результат моделювання може бути представлений або у вигляді розподілу (гістограми) концентрацій мінералів у кожній комірці, або для кожного

компоненту в кожній комірці визначається середнє значення (медіана, мода) та довірчі межі (середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт варіації тощо).

Узагальнена схема моделювання складається із блоків формування ймовірнісних характеристик вхідних даних, розв'язання прямих задач геофізики та відбору множини математично коректних розв'язків. Найголовнішу роль у побудові коректних моделей середовища відіграє вибір та обґрунтування математичної моделі розрахунку петрофізичних параметрів геологічного середовища.

Як розрахункові алгоритми для задач сейсмоакустики, термометрії, магнітометрії та електрометрії використовується метод умовних моментних функцій, реалізація якого неодноразово здійснена Г.Т. Продайвода у співавторстві (Продайвода та ін., 2012).

Алгоритм, що пропонується у даному дослідженні, спрямований на вирішення проблеми прогнозування речовинного складу за даними глибинних досліджень (глибинне сейсмічне зондування, глибинна термометрія та електрометрія). Специфіка мережі спостережень цих методів (переважно профільні або точкові вимірювання) не дозволяє впевнено фіксувати анізотропію параметрів, що вивчаються (фазові швидкості об'ємних пружних хвиль, теплопровідність, електропровідність тощо). Тому в програмних засобах авторами реалізовано алгоритми, засновані на ізотропній моделі середовища, наближеній до зернистої – форма включень вважається ізометричною, розподіл орієнтації кристалографічних осей мінералів рівноімовірний за усіма напрямками, що за великої кількості елементів дає статистично усереднене значення параметрів. Однак за потреби ядро алгоритмів розв'язання прямих задач геофізики може бути заміщене на інше, що використовує анізотропну модель, без значних затрат на зміну загального алгоритму моделювання.

Пряма задача сейсмоакустики. Розрахунок фазових швидкостей пружних хвиль здійснюється у декілька етапів. Вважається, що геологічне середовище перебуває в умовах дії всебічного стискування та температури, які можна вважати постійними у межах комірки моделювання. На першому етапі здійснюється розрахунок модулів об'ємного стискування, зсуву, коефіцієнта лінійного розширення у заданих умовах тиску та температури для кожного компоненту моделі за схемою:

$$X(P, T) = X_0 + P \left(\frac{\partial X}{\partial P} \right)_{T=\text{const}} + T \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_{P=\text{const}}, \quad (4)$$

де X – модуль об'ємного стискування K або модуль зсуву G , або коефіцієнт лінійного розширення α , параметр з індексом нуль означає значення параметра в лабораторних умовах; P – тиск; T – температура. Після цього визначається скориговане значення густини:

$$\rho(P, T) = \rho_0 \left(1 + \frac{P}{K(P, T)} - 3\alpha(P, T)T \right), \quad (5)$$

де ρ_0 – густина мінералу в лабораторних умовах.

База даних петрофізичних параметрів мінералів та їх похідних за тиском та температурою формується за результатами лабораторних досліджень (Janik et al., 2007; Stixrude and Lithgow-Bertelloni, 2005; Anderson et al., 1992).

На другому етапі здійснюється статистичне усереднення пружних модулів об'ємного стискування K та зсуву G для макроскопічного об'єму середовища за методом умовних моментних функцій з розрахунковою схемою Мори-Танака. Програмно авторами повторно реалізований алгоритм, опублікований у (Продайвода та ін., 2003). За необхідності введення компоненти, що відповідає за пустотний простір (пружні характеристики відповідають властивостям флюїду – повітря, вода, газ тощо), проводиться повторне статистичне усереднення. При цьому отримані на попередньому етапі пружні модулі вважаються параметрами однорідної матриці, а пустоти можуть мати різну форму, що задається еліпсоїдом обертання.

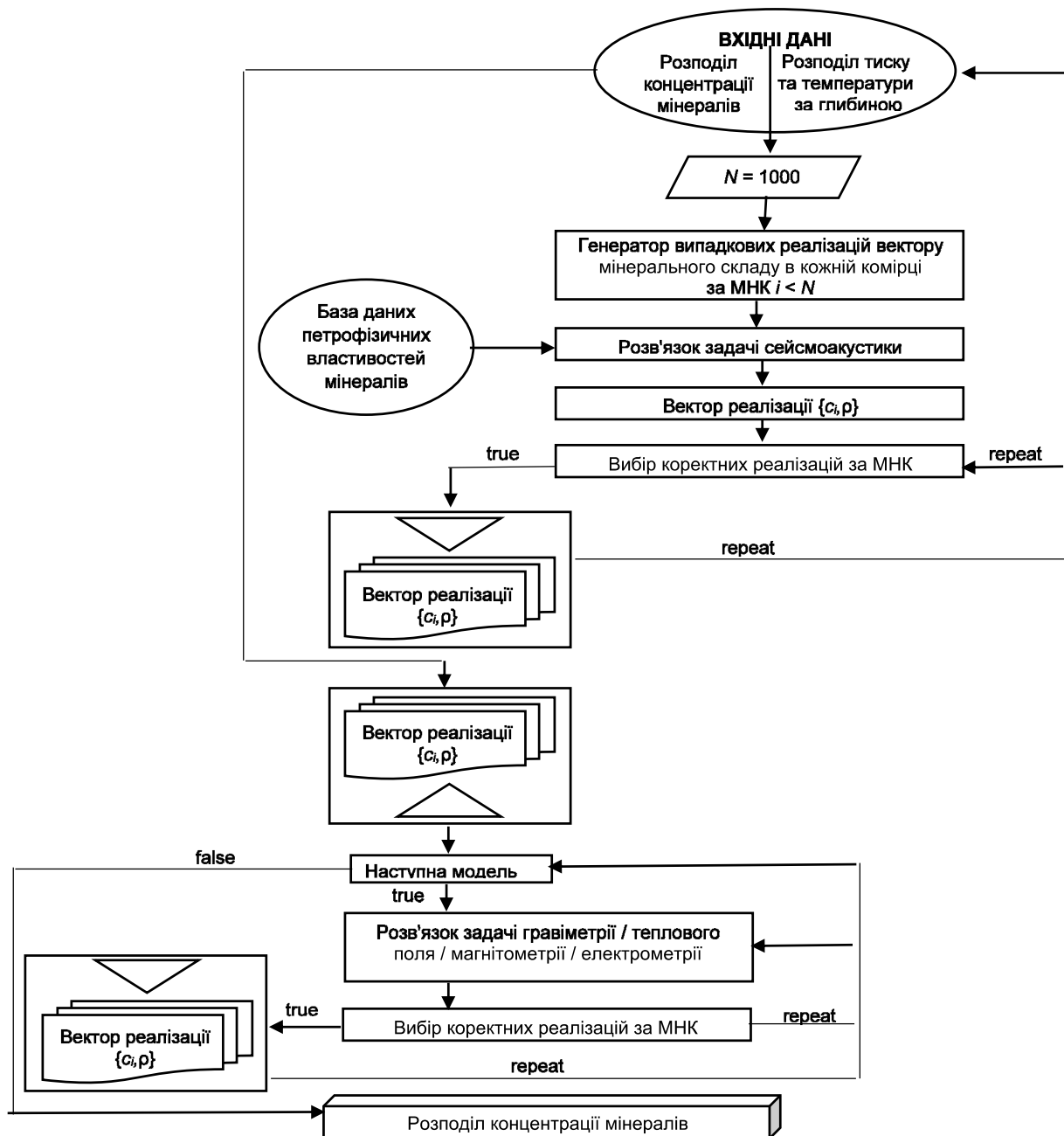


Рис. 1. Блок-схема алгоритму інтегрованого стохастичного моделювання речовинного складу геологічного середовища для комплексу геофізичних методів

Осереднення густини відбувається пропорційно до об'ємних концентрацій компонентів c_i :

$$\rho^* = \sum_{i=1}^N \rho_i(P, T) c_i \quad (6)$$

де N – кількість компонент моделі у даній комірці.

Фазові швидкості повздовжньої V_P та поперечної V_S пружних хвиль визначаються як

$$V_P = \sqrt{\frac{K^* + 4/3 G^*}{\rho^*}} \quad (7)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G^*}{\rho^*}} \quad (8)$$

Пряма задача гравіметрії. Для розрахунку аномального гравітаційного поля у заданих точках середовища (x_k , y_k , z_k) реалізовані формули розрахунку гравітаційного потенціалу точки (сфери заданого радіуса), кубу (з гранями орієнтованими: 1) горизонтально у площині профілю; 2) перпендикулярно до профілю та 3) вертикально), нескінченного горизонтального циліндра, паралелепіпеда та

нескінченного паралелепіпеда з довгими вісями, орієнтованими горизонтально перпендикулярно до площини профілю (Голіздра, 1977; Маловичко и Костицын, 1992; Миронов, 1980; Старостенко, 1978). Для кожної комірки визначається поточне значення густини, як частина рішення задачі сейсмоакустики (6) та значення нормальної густини ρ_n , яке встановлюється константою або визначається із лінійної залежності від глибини:

$$\rho_n = \rho_n^0 \left(1 + \frac{\partial \rho_n}{\partial z}\right) \quad (9)$$

де ρ_n^0 – нормальна густина на поверхні геоїда.

Сумарний розв'язок задачі для заданої точки поверхні спостереження можна представити у вигляді

$$\Delta g_a^k = \sum_{j=1}^M (\rho_j^* - \rho_n^j) \cdot F_{jk}^{CORE}(G, V, x_k, y_k, z_k, \xi_j, \eta_j, \zeta_j) \quad (10)$$

де M – загальна кількість комірок моделі; G – гравітаційна стала; V – об'єм комірки; k – індекс поточної точки вимірювання поля сили тяжіння; (ξ_j, η_j, ζ_j) – координати

центру ваги j комірки моделі; F_{jk}^{CORE} – постійна частина розрахункових формул гравітаційного потенціалу, що залежить від координат точок та гравітаційної сталої.

Геометрія моделі. Для задачі сейсмоакустики значення швидкостей визначаються поточною. При цьому відстань між сусідніми точками має задовольняти умову значного перевищення характерних розмірів структурних елементів середовища (зерен мінералів та мікротріщин). Для сумішених із задачами потенціальних полів вважається, що двовимірний модель складається із прямокутних паралелепіпедів з гранями, що орієнтовані горизонтально та вертикально. Швидкість визначається для геометричного центру комірки та екстраполюється на всю комірку. У найбільш простому варіанті реалізується мережа квадратних у площині профілю комірок, розташованих з рівним кроком як по вертикалі, так і по латералі. Контроль відсутності пустих інтервалів у моделі покладається на користувача. Для задач гравіметрії та магнітометрії розмір комірки у напрямку перпендикулярно площині профілю регулюється користувачем.

Описаний алгоритм є частиною нового інтерпретаційного пакету даних глибинних досліджень земної кори, що розробляється на кафедрах геоінформатики та геофізики ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Висновки та дискусія. Запропонований алгоритм має такі переваги щодо ітераційних методів інверсії з оптимізацією вхідних параметрів:

- 1) усі отримані розв'язки мають геологічний зміст, що обмежується розподілами ймовірності концентрацій породотвірних мінералів;
- 2) відсутні проблеми оптимізації з обмеженнями, пов'язані з визначеністю вхідних параметрів на короткому інтервалі $[0, 1]$;
- 3) розв'язок не залежить від вибору моделі початкового наближення;
- 4) результатом моделювання є статистично значуща сукупність розв'язків, що дає змогу обґрунтовано обрати найбільш імовірне значення та визначити довірчі межі розв'язку.

Реалізований програмний комплекс буде використано для моделювання речовинного складу земної кори в межах Українського щита (у першу чергу Кіровоградського блоку) та Фенноскандії.

Список використаних джерел

- Банди, Б. (1988). Методы оптимизации. М.: Радио и связь.
- Вижва, С., Продайвода, Г., Віршило, І. (2010). Методологічні і теоретичні принципи сейсмогравітаційної томографії. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 48, 29–33.
- Вижва, С., Продайвода, Г., Віршило, І., Козіонова, О. (2013). Проблеми інформаційного забезпечення інтерпретаційних технологій геофізичної томографії. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 62, 57–62.
- Гаврилов, В.П. (2005). Геотектоника. *Нефть и газ*, 368, 30–66.
- Голиздра, Г.Я. (1977). Основные методы решения прямой задачи гравиразведки на ЭВМ. *Обзор ОНТИ ВИЗМС. Сер. Регион., развед. и промысл. геофиз.*, 99.
- Евтушенко, Ю. Г., Малков, В. У., Станевичюс, А. А. (2009). Параллельный поиск глобального экстремума функции многих переменных. *Вычисл. матем. и мат. физ.*, 49, 2, 255–269.
- Косминская, И.П., Давыдова, Н.И. (1980). Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. *Сейсмические модели*. М.: Наука, 11–15.
- Маловичко, А.К., Костицын, В.И. (1992). Гравиразведка, М.: Недра.
- Маслов, Б.П., Продайвода, Г.Т. (1998). Дисперсия и рассеяние упругих волн в трещиноватой геологической среде. *Геофизический журнал*, 20 (2), 47–55.
- Миронов, В.С. (1980). Курс гравиразведки. Л.: Недра.
- Нолет, Г. (Ред.) (1990). Сейсмическая томография. М.: Мир.
- Продайвода, Г., Зінченко, О., Козіонова, О. (2005). Методологічні принципи формування бази даних головних літотипів для визначення речовинного складу земної кори північно-західного району Українського щита сейсмогравітаційним методом. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 34, 11–18.

- Продайвода, Г. Т., Вижва, С.А., Віршило, І.В. (2012). Математичне моделювання геофізичних параметрів. К.: ВПЦ "Київ. ун-т".
- Продайвода, Г. Т., Гришук, П. І. (2007). Гравіметричний метод геокартування структурно-речовинних комплексів Українського щита. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 41, 7–10.
- Продайвода, Г.Т., Маслов, Б.П., Продайвода, Т.Г. (2003). Сейсмомінералогічна модель верхньої мантиї. *Фізика Землі*, 2, 3–14.
- Ризниченко, О.Ю. (2016). ГСЗ: От глубинной сейсморазведки к сейсмологии контролируемых источников. К столетию со дня рождения И.П. Косминской. *Геофизические исследования*, 17 (2), 77–82.
- Соллогуб, В. Б. (1986). Литосфера Украины. Киев: Наук. думка.
- Соллогуб, В. Б., Чекунов, А. В., Трипольский, А. А., Бабинцев, В. А. (1978). Результаты исследования глубинного строения Украинского щита. Строение коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы. К.: Наук. думка, 136–147.
- Старостенко, В.И. (1978). Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. К.: Наукова думка.
- Старостенко, В.И., Костюкевич, А.С., Козленко, В.Г. (1988). Комплексная интерпретация сейсмометрии и гравиметрии. Принципы и методика. *Изв. АН СССР, Физика Земли*, 4, 33–49.
- Старостенко, В.И., Шванцара, Я. (1994). Сейсмогравитационное моделирование при изучении литосферы. К.: Наук. думка.
- Трипольский, А.А., Шаров, Н.В. (2004). Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. Петрозаводск. Карельский научный центр Российской академии наук, Институт геологии. Национальная академия наук Украины, Институт геофизики.
- Тулина, Ю.В., Бурмин, В.Ю., Шемелева, И.Б. (2011). К проблеме неоднозначности интерпретации наблюдаемых данных глубинного сейсмического зондирования. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия.
- Шаров, Н. В. (2012). Сопоставление геофизических разрезов земной коры с результатами бурения глубоких скважин на Фенноскандинавском щите. Институт геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, Россия.
- Шарый, С.П. (2008). Рандомизированные алгоритмы в интервальной глобальной оптимизации. *Сибир. журн. вычисл. матем.*, 11, 4, 457–474.
- Anderson, O., Isaak, D., Oda, H. (1992). High-Temperature Elastic-Constant Data on Minerals Relevant to Geophysics. *Reviews of Geophysics*, 30 (1), 57–90. <https://doi.org/10.1029/91RG02810>
- Christensen, N. I., Mooney, W. D. (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research*, 100(B6), 9761. doi:10.1029/95JB00259
- FENNIA Working Group. (1998). P- and S-velocity structure of the Baltic Shield beneath the FENNIA profile in southern Finland. *Report*. Univ. of Helsinki.
- Grad, M., Luosto, U. (1994). Seismic velocities and Q-factors in the uppermost crust beneath the SVEKA profile in Finland. *Tectonophysics*, 230, 1–18. doi:10.1016/0040-1951(94)90144m9.
- Grad, M., Tripolsky, A. A. (1994). Structure of the Ukrainian shield. P. 3: Seismic and petrological models of the Ukrainian shield. *Acta Geophysica Polonica*, 42, 1, 23–44.
- Grad, M., Tripolsky, A. A. (1995). Crustal structure from P and S seismic waves and petrological models of the Ukrainian shield. *Tectonophysics*, 250, 89–112.
- Janik, T., Kozlovskaya, E., Heikkinen, P., Yliniemi, J., Silvennoinen, H. (2009). Evidence for preservation of crustal root beneath the Proterozoic Lapland-Kola orogen (northern Fennoscandian shield) derived from P and S wave velocity models of POLAR and HUKKA wide-angle reflection and refraction profiles and FIRE4 reflection transect. *Journal of Geophysical Research*, 114, B06308. doi:10.1029/2008JB005689
- Janik, T., Kozlovskaya, E., Yliniemi, J. (2007). Crust-mantle boundary in the central Fennoscandian shield: Constraints from wide-angle P and S wave velocity models and new results of reflection profiling in Finland. *Journal of Geophysical Research*, 112(B4), 1–28. <http://doi.org/10.1029/2006JB004681>
- Kozlovskaya, E., Elo, S., Hjelt, S.-E., Yliniemi, J., Pirttijarvi, M. and SVEKALAPKO STWG. (2004). 3D density model of the crust of southern and central Finland obtained from joint interpretation of SVEKALAPKO crustal P-wave velocity model and gravity data. *Geophysical Journal International*, 158, 827–848.
- Lines, L.R., Schultz, A.K., Treitel, S. (1988). Cooperative inversion of geophysical data. *Geophysics*, 53, 1, 8–20.
- Luosto, U. et al. (1989). The crustal structure along the POLAR Profile from seismic refraction investigation. *Tectonophysics*, 162, 51–85. doi:10.1016/0040-1951(89)90356-9
- Mahdavi-Amiri, N., Bartels, R.H. (1989). Constrained Nonlinear Least Squares: An Exact Penalty Approach with Projected Structured Quasi-Newton Updates. *ACM Trans. Mathem. Software*, 15, 3, 220–242.
- Prodaivoda, G. T., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V., Vyzhva, S. A. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 36 (5), 394–405.
- Silvennoinen, H., Kozlovskaya, E. (2007). 3D structure and physical properties of the Kuhmo Greenstone Belt (eastern Finland): Constraints from gravity modeling and seismic data and implications for the tectonic setting. *Journal of Geodynamics*, 43 (3), 358–373. <http://doi.org/10.1016/j.jog.2006.09.018>
- Silvennoinen, H., Kozlovskaya, E. (2010). Upper Crustal Velocity and Density Models along FIRE4 Profile. *Geophysics*, 46 (1–2), 21–46.
- Stixrude, L., Lithgow-Bertelloni, C. (2005). Thermodynamics of mantle minerals I. Physical properties. *Geophysical Journal International*, 162 (2), 610–632.

References

- Anderson, O., Isaak, D., Oda, H. (1992). High-Temperature Elastic-Constant Data on Minerals Relevant to Geophysics. *Reviews of Geophysics*, 30 (1), 57-90. <https://doi.org/10.1029/91RG02810>
- Bandy, B. (1988). Metody optimizatsii. M.: Radio i svyaz. [in Russian]
- Christensen, N. I., Mooney, W. D. (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research*, 100(B6), 9761. doi:10.1029/95JB00259
- Evtushenko, U.G., Malkov, V.U., Stanevichus, A.A. (2009). Parallelniy poise globalnogo ekstremuma funktsii mnogih peremennyh. *Vychisl. matem. i mat. fis.*, 49, 2, 255-269. [in Russian]
- FENNIA Working Group. (1998). P- and S-velocity structure of the Baltic Shield beneath the FENNIA profile in southern Finland. *Report*. Univ. of Helsinki.
- Gavrilov, V.P., (2005). Geotektonika. *Neft i gas*, 368, 30-66. [in Russian]
- Golizdra, G.Ya. (1977). Osnovnye metody resheniya pryamoy zadachi gravirazvedki na EVM. *Obzor ONTI VIEMS. Ser. Region., raved. I promysl. geofiz.*, 99. [in Russian]
- Grad, M., Tripolsky, A. A. (1994). Structure of the Ukrainian shield. P. 3: Seismic and petrological models of the Ukrainian shield. *Acta Geophysica Polonica*, 42, 1, 23-44.
- Grad M., Tripolsky, A. A. (1995). Crustal structure from P and S seismic waves and petrological models of the Ukrainian shield. *Tectonophysics*, 250, 89-112.
- Grad, M., Luosto, U. (1994). Seismic velocities and Q-factors in the uppermost crust beneath the SVEKA profile in Finland. *Tectonophysics*, 230, 1-18. doi:10.1016/0040-1951(94)90144-9.
- Janik, T., E. Kozlovskaya, P. Heikkinen, J. Yliniemi, and H. Silvennoinen. (2009) Evidence for preservation of crustal root beneath the Proterozoic Lapland-Kola orogen (northern Fennoscandian shield) derived from P and S wave velocity models of POLAR and HUKKA wide-angle reflection and refraction profiles and FIRE4 reflection transect. *J. Geophys. Res.* 114, B06308, doi:10.1029/2008JB005689
- Janik, T., Kozlovskaya, E., Yliniemi, J. (2007). Crust-mantle boundary in the central Fennoscandian shield: Constraints from wide-angle P and S wave velocity models and new results of reflection profiling in Finland. *Journal of Geophysical Research*, 112(B4), 1-28. <http://doi.org/10.1029/2006JB004681>
- Kosminskaya, I.P., Davydova, N.I. (1980). Seismicheskie modeli litosfery I osnovnykh geostruktur territorii SSSR. Seismicheskie modeli. M.: Nauka, 11-15. [in Russian]
- Kozlovskaya, E., Elo, S., Hjelt, S.-E., Yliniemi, J., Pirttijarvi, M. and SVEKALAPKO STWG. (2004). 3D density model of the crust of southern and central Finland obtained from joint interpretation of SVEKALAPKO crustal P-wave velocity model and gravity data. *Geophysical Journal International*, 158, 827-848.
- Lines, L.R., Schultz, A.K., Treitel, S. (1988). Cooperative inversion of geophysical data. *Geophysics*, 53, 1, 8-20.
- Luosto, U. et al. (1989). The crustal structure along the POLAR Profile from seismic refraction investigation. *Tectonophysics*, 162, 51-85. doi:10.1016/0040-1951(89)90356-9
- Mahdavi-Amiri, N., Bartels, R.H. (1989). Constrained nonlinear least squares: An Exact Penalte Approach with Projected Structured Quasi-Newton Updates. *ACM Trans. Mathem. Software*, 15, 3, 220-242.
- Malovichko, A.K., Kosticyn, V.I. (1992). Gravirazvedka. M.: Nedra. [in Russian]
- Maslov, B.P., Prodayvoda, G.T. (1998). Dispersiya i rasseyaniye uprugih voln v treschinovatykh geologicheskoy srede. *Geofizicheskiy zhurnal*, 20, 2, 47-55. [in Russian]
- Mironov, V.S. (1980). Kurs gravirazvedki. L.: Nedra. [in Russian]
- Noleta, G. (Edc.). (1990). Seismicheskaya tomografiya. M.: Mir. [in Russian]
- Prodayvoda, H. T., Hryshchuk, P. I. (2007). Hravimetrychnyi metod heokartuvannia strukturno-rechovnykh kompleksiv Ukrainskoho shchytia. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 41, 7-10. [in Ukrainian]
- Prodayvoda, G.T., Maslov, B.P., Prodayvoda, T.G. (2003). Seismomineralogical model of the continental upper mantle. *Fizika Zemli*, 2, 3-14. [in Russian]
- Prodayvoda, G. T., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V., Vyzhva, S. A. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 36(5), 394-405. [in Russian]
- Prodayvoda, G., Zinchenko, O., Kozionova, O. (2005). Methodological principle of formation of main lithotypes database for determination of Earth crust composition of north-west region of Ukrainian shield by seismogravitational method. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 34, 11-18. [in Ukrainian]
- Prodayvoda, G.T., Vyzhva, S.A., Virshylo, I.V. (2012). Matematychnye modelyuvannya geofizichnykh parametriv. Kyiv: VTS "Kyivskiy universytet". [in Ukrainian]
- Riznichenko, O.Yu. (2016). GSZ: Ot glubinnoy seysmorazvedki k seysmologii kontroliuemykh istochnikov. K stoletiyu so dnya rozhdeniya I.P. Kosminskoy. *Geofizicheskie issledovaniya*, 17, 2, 77-82. [in Russian]
- Sharov, N. V. (2012) Comparison of the geophysical sections of the earth crust with the results of deep drilling in the Fennoscandian shield. *Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. [in Russian]
- Shary, S.P. (2008). Randomized algorithms in interval global optimization. *Siberian J. Num. Math.*, 11, 4, 457-474. [in Russian]
- Silvennoinen, H., Kozlovskaya, E. (2007). 3D structure and physical properties of the Kuhmo Greenstone Belt (eastern Finland): Constraints from gravity modelling and seismic data and implications for the tectonic setting. *Journal of Geodynamics*, 43(3), 358-373. <http://doi.org/10.1016/j.jog.2006.09.018>
- Silvennoinen, H., Kozlovskaya, E. (2010). Upper crustal velocity and density models along FIRE4 profile. *Geophysics*, 46(1-2), 21-46.
- Sollogub, V. B. (1986). Litosfera Ukrainyi. Kiev: Nauk. dumka. [in Russian]
- Sollogub, V. B., Chekunov, A. V., Tripolskiy, A. A., Babinets, V. A. (1978). Rezultaty issledovaniya glubinnoy stroyeniya Ukrainskogo shchita. Stroyeniye kory i verkhney mantii Tsentral'noy i Vostochnoy Yevropy. Kiev: Nauk. dumka, 136-147. [in Russian]
- Starostenko, V.I. (1978). Ustoychivyye chislennyye metody v zadachah gravimetrii. K.: Nauk. dumka. [in Russian]
- Starostenko, V.I., Kostyukevich, A.S., Kozlenko, V.G. (1988). Kompleksnaya interpretatsiya seysmometrii i gravimetrii. Printsipy i metodika. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 4, 33-49. [in Russian]
- Starostenko, V.I., Shvantsara, Ya. (1994). Seysmogravitatsionnoe modelirovaniye pri izuchenii litosfery. K.: Nauk. dumka. [in Russian]
- Stixrude, L., Lithgow-Bertelloni, C. (2005). Thermodynamics of mantle minerals - I. Physical properties. *Geophysical Journal International*, 162 (2), 610-632.
- Tripolsky, A. A., Sharov, N. V. (2004). Structure of the precambrian shields of the northern hemisphere of the Earth lithosphere by seismic data. Petrozavodsk. Karelian research centre Russian academy of sciences, Institute of Geology. National academy of sciences of Ukraine, Institute of Geophysics. [in Russian]
- Tulina, Yu.V., Burmin, V.Yu., Shemeleva, I.B. (2011). To ambiguity problem of interpretation of deep seismic sounding data. Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. [in Russian]
- Vyzhva, S., Prodayvoda, G., Virshylo, I., Kozionova, O. (2013). The problems of information support of geophysical tomography interpretive technologies. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 62, 57-62. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Prodayvoda, G., Virshylo, I. (2010). Metodolohichni i teoretychni pryncypy seysmogravitatsiynoy tomohrafiyi. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 48, 29-33. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 14.12.18

I. Virshylo, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: ivirshylo@gmail.com
I. Pap, PhD student,
E-mail: papiryna@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

INTEGRATED STOCHASTIC MODELING OF PETROPHYSICAL PARAMETERS FOR THE ESTIMATION OF MINERALOGICAL COMPOSITION OF THE EARTH CRUST

The construction of a new algorithm for spatial modeling of the composition of rocks, which is consistent with the results of geophysical, petrophysical and geochemical studies, is considered. The probability distributions of the quantities simulated – volume concentrations of rock-forming minerals and voids and the parameters of the thermally stressed state of the medium – pressure and temperature are used as input parameters of the model. The determination of probability distributions is carried out by statistical processing of the results of geological and geochemical studies for the composition and the introduction of confidence intervals for the results of geophysical studies. The method of conditional moment functions for the problem of seismic acoustics, thermometry, magnetometry and electrometry is used as calculation algorithms. The algorithm is based on a multicomponent matrix model of a medium with ellipsoidal inclusions and has no restrictions on the concentration of components. The algorithm makes it possible to take into account arbitrary symmetry of the medium. The result of the simulation is a statistically significant set of decisions that have a geological meaning and are limited to the probability distribution of the concentrations of rock-forming minerals.

Keywords: deep seismic sounding, seismic and mineralogical models, global optimization methods, stochastic methods, direct problem of seismic acoustics, Monte Carlo method, method of conditional moment functions.

И. Виршило, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: ivirshylo@gmail.com

И. Пап, асп.,

E-mail: papiryna@gmail.com

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ИНТЕГРИРОВАННОЕ СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗЕМНОЙ КОРЫ

Рассматривается построение нового алгоритма пространственного моделирования вещественного состава горных пород, который согласуется с результатами геофизических, петрофизических и геохимических исследований. В качестве входных параметров модели используются распределения вероятности величин, которые моделируются – объемные концентрации породообразующих минералов и пустотного пространства, и параметры термонапряженного состояния среды – давление и температура. Определение распределений вероятности осуществляется путем статистической обработки результатов геологических и геохимических исследований для вещественного состава и введением доверительных интервалов для результатов геофизических исследований. В качестве расчетных алгоритмов для задач сейсмоакустики, термометрии, магнитометрии и электрометрии используется метод условных моментных функции. В основе алгоритма лежит многокомпонентная матричная модель среды с эллипсоидальными включениями, которая не имеет ограничений на концентрацию компонентов и позволяет учитывать произвольную симметрию среды. Результатом моделирования является статистически значимая совокупность решений, которые имеют геологический смысл и ограничиваются распределением вероятности концентраций породообразующих минералов.

Ключевые слова: глубинное сейсмическое зондирование, сейсмо-минералогические модели, методы глобальной оптимизации, стохастические методы, прямая задача сейсмоакустики, метод Монте-Карло, метод условных моментных функции.

ПОДІЇ

В. Курганский, д-р геол.-минералог. наук, проф.,
E-mail: kurgan40@ukr.net

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

К 75-летию геологического факультета
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

"ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН" – 50 ЛЕТ В КИЕВСКОМ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ ТАРАСА ШЕВЧЕНКО

Наука начинается с сомнений,
Поэзия – от боли или радости в груди.
Поэзия, наука – это вдохновение,
Влюбленность в дело, как тут не крути.
В. Курганский

Дана ретроспектива развития "Геофизических исследований скважин" – как учебной дисциплины, так и научного направления в Киевском национальном университете имени Тараса Шевченко. Полный курс предмета для студентов геофизической специальности начал преподаваться с 1969 года. На основе профильной дисциплины автором статьи были разработаны спецкурсы "Промысловая геофизика", "Каротаж рудных скважин", "Петрофизика и геофизика коллекторов нефти и газа".

В статье рассмотрены вопросы петрофизического моделирования, разработанные автором способы выделения и изучения сложнопостроенных коллекторов по данным ГИС и петрофизики, которые нашли практическое применение на всех этапах интерпретации промыслово-геофизических материалов при исследовании карбонатных пород разных нефтегазовых регионов СССР и СНГ.

Широкомасштабное строительство наклонно-направленных и горизонтальных скважин за рубежом в последние десятилетия стало возможным благодаря созданию современных забойных телеметрических систем (MWD / LWD – систем). В Киевском национальном университете были созданы и успешно опробованы: первая в Украине забойная бескабельная телеметрическая система ПАРКУС с электромагнитным каналом связи, забойный сбрасываемый автономный инклинометр, шестирычажный пластинчатый наклонмер НП-6.

За 50 лет (1969–2019 гг.) кафедра геофизики выпустила сотни бакалавров, специалистов, магистров, десятки кандидатов и докторов наук, которые связали свою профессиональную деятельность с геофизическими методами исследования скважин.

Ключевые слова: геофизические исследования скважин (каротаж), петрофизическое моделирование, карбонатные породы, коллектор, интерпретация, пористость, насыщение, геонавигация, телесистема в процессе бурения, автономный инклинометр, микромеханические датчики.



Геофизические исследования скважин (ГИС) – важная, неотъемлемая часть прикладной геофизики. Основное направление ГИС – промысловая геофизика, методы которой изучают геологические разрезы нефтяных и газовых скважин, которые представляют собой весьма сложный объект – диффузную систему "скважина – горные породы", изменяющий свои свойства и параметры во времени и пространстве. Из всех направлений разведочной геофизики, она наиболее богата на методы и модификации исследований, оперирует широчайшим спектром (от данных бурения до результатов испытаний) исходной и полученной в процессе исследований геофизической, промысловой, петрофизической и другой информацией. Действительно, многочисленные и очень разные задачи, детальность и точность их решения на всех этапах поиска, разведки, доразведки, подсчета запасов углеводородного сырья, разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений (вплоть до их закрытия), сложные, с малой степенью свободы скважинные условия проведения исследований – все это делает промысловую геофизику не только специфическим, но и наиболее интеллектуально насыщенным направлением прикладной геофизики. Реализация многих десятков промыслово-геофизических методов решения задач, основанных на применении практически всех известных естественных и искусственных физических, физико-химических, геохимических и других полей требует соответствующего

теоретического обоснования (решения прямых и обратных задач), дорогостоящего материально-технического оснащения, методического обеспечения и, может быть, самое главное – наличия разносторонне подготовленных, высококвалифицированных специалистов, в равной степени хорошо владеющих знаниями в области геолого-геофизических, физико-математических наук, а также в области бурения, электроники и компьютерной техники.

Полный курс "Геофизических исследований скважин" для студентов геофизической специальности стал преподаваться с 1969 года. Предмет, ставший профильным, состоит из физических основ геофизических методов исследования скважин (ГМИС), технологии их проведения, области применения и задач, решаемых по данным ГМИС, качественной и количественной интерпретации первичных результатов, полученных в процессе изучения скважин.

На основе профильной дисциплины автором статьи были разработаны спецкурсы "Промысловая геофизика", "Каротаж рудных скважин", "Петрофизика и геофизика коллекторов нефти и газа". Все предметы обеспечены методическим сопровождением – программой, литературой, методическими указаниями и контрольными заданиями для самостоятельной работы студентов.

На этапе организации учебного процесса, важная поддержка была оказана кафедрой промысловой геофизики МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, лично заведующим кафедрой, профессором В.Н. Дахновым – основателем и руководителем первой в мире кафедры по специальности "Геофизические исследования скважин", создателем главной научной школы отечественной промысловой геофизики и петрофизики.

Чтение тех или иных курсов, соотношение между лекционным материалом, лабораторными занятиями и самостоятельной работой студентов регламентируется конъюнктурой, количеством обучающихся и их общей подготовкой.

В создании учебной и научно-исследовательской лаборатории ГИС в разное время, под руководством В. Курганского, принимали участие Л. Науменко, В. Мартыненко, С. Балашов, В. Храпак, И. Тишаев. Большую помощь в оснащении лаборатории промыслово-геофизической аппаратурой, организации учебной и производственной практик оказало руководство треста "Укр-геофизика" (с 1979 г. Государственное геофизическое предприятие ГПП "Укргеофизика") – А.А. Потушанский, Д.Д. Глагола. Тесное сотрудничество кафедры геофизики с Полтавской, Нежинской ЭГИС, другими подразделениями ГПП "Укргеофизика", сотрудничество с Институтом геофизики НАН Украины, Украинским государственным геологоразведочным институтом (УкрГГРИ), Украинским научно-исследовательским проектным институтом нефтедобывающей промышленности (УкрНИИПНД), Опытным конструкторским бюро "Геофизприбор" (ОКБ "Геофизприбор") позволило студентам знакомиться с современными технологиями проведения геофизических исследований скважин, способами обработки и интерпретации данных ГМИС, самим, при подготовке

курсовых, бакалаврских, дипломных и магистерских работ, ставить и решать конкретные задачи, связанные с поисками и разведкой полезных ископаемых.

При поддержке специалистов Государственного регионального предприятия "Севгеология" на территории геологического факультета была пробурена и специальным способом обсажена 100-метровая скважина, что позволило не только проводить лабораторные работы в условиях, максимально приближенных к реальным условиям изучения разрезов скважин, но и использовать её при проведении научных исследований.

Опыт в учебно-методической, научной работе, знание французского языка позволили автору с 1975 г. по 1978 г., работая в качестве профессора кафедры геофизики Алжирского национального института нефти и химии, совместно с коллегами Московского, Грозненского, Бакинского, Ивано-Франковского нефтяных институтов и др. вузов СССР преподавать студентам из Алжира, Марокко, Туниса курсы "ГИС" (Diagraphies) и "Петрофизика". Технология проведения исследований (тип аппаратуры, калибровка, единицы и масштабы записи), способы обработки и интерпретации данных каротажа и петрофизики (номограммы, палетки, корреляционные зависимости и т.д.), используемые на практике в нефтегазовых организациях Алжира – все это стало полезным при дальнейшей работе по возвращении на Родину.



Алжирский национальный институт нефти и химии – консультация по курсу: "Геофизические исследования скважин" (1977 г.)

Непрерывной, начиная с 1984 г., и весьма плодотворной является совместная работа специалистов кафедры геофизики геологического факультета и кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета КНУ в области разработки и создания новых технологий каротажа скважин. Участие в работе аспирантов и студентов закрепляет полученные знания, расширяет их научный кругозор, позволяет видеть перспективу развития ГИС. Такая перспектива развития учебного и научного направления, связанного с ГИС, перспектива повышения качества подготовки высококвалифицированных специалистов в этой области, появилась благодаря предложению создать межфакультетскую специальность "Математическое, электронное и компьютерное сопровождение геофизических исследований скважин в процессе бурения". Предложение было поддержано учёными советами обоих факультетов. В специалистах такого профиля заинтересованы государственные и частные нефтегазодобывающие организации Украины. К сожалению, экономическая обстановка не позволила осуществить этот

замысел, но сама идея остаётся актуальной и при благоприятных условиях может быть реализована.

Параллельно с учебным с 1970 года В. Курганским создаётся научное направление, связанное с проблемой выделения, классификации и определения ёмкостных и фильтрационных свойств сложнопостроенных коллекторов нефти и газа по данным промысловой геофизики и петрофизики. Основной объект исследования – карбонатные отложения разных нефтегазоносных регионов Союза, а затем СНГ – был выбран не случайно. Более 60 % мировой добычи углеводородного сырья связано с карбонатными отложениями, которые широко развиты как в складчатых, так и в платформенных областях и характеризуются широким стратиграфическим диапазоном нефтегазоносности (от нижнего кембрия до миоцена). Полиминеральный состав скелета, неоднородная структура порового пространства, глубокое проникновение фильтрата, а иногда и самого бурового раствора, мешающие судить об истинных физических свойствах породы и характере её насыщения; глинизация и битуминозность; соизмеримость в ряде случаев

искомой эффективной ёмкости коллекторов с возможными при количественной интерпретации ошибками – эти и другие особенности объекта исследований требуют особого качества, особой обоснованности и точности исходной геолого-геофизической информации, положений и петрофизических зависимостей (моделей), на основе которых предполагается вести изучение такого типа коллектора.

Особенности условий геофизических измерений в скважинах, вскрывающих карбонатные разрезы: часто повышенная минерализация бурового раствора, его быстрая фильтрация в пласты-коллекторы, сложные термобарические условия резко снижают эффективность большинства методов ГИС, в первую очередь электрических. Характерный для сложнопостроенных карбонатных пород низкий вынос керна (особенно высокопористых трещиновато-кавернозных разностей), отсутствие эффективных прямых контрольных способов их изучения в термобарических условиях залегания in

situ обесценивают результаты лабораторных исследований (дифференциальных характеристик), затрудняют их сопоставления с данными каротажа (с интегральными характеристиками).

Все выше сказанное говорит о сложности и актуальности рассматриваемой проблемы, особенно в условиях диффузной системы "скважина-пласт", которая "дышит" и постоянно меняет свои свойства во времени и пространстве. Несмотря на достаточно большое количество научно-исследовательских работ и достижений в этой области, карбонатные коллекторы во многом ещё остаются непознанными, остаются "вещью в себе". Вот почему совершенствование известных и разработка новых конкурентно-способных методов изучения сложнопостроенных карбонатных коллекторов по промыслово-геофизическим данным является важным научным направлением, способствующим наращиванию разведанных запасов нефти и газа, обеспечивающим развитие и укрепление энергетической базы страны.



Конференция EAGE, Женева, 1997 г. Доклад на тему:
"Методика выделения и изучения сложнопостроенных карбонатных коллекторов нефти и газа"

Под руководством автора и при его непосредственном участии совершенствовались известные, разрабатывались и внедрялись в производство новые способы обработки и интерпретации данных ГИС и петрофизики с конечной целью определения граничных значений коллекторских свойств изучаемых пород на этапе выделения нефтегазосодержащих пластов и обоснования подсчетных параметров на этапе подсчета запасов нефти и газа. В частности, в рамках обозначенной проблемы были решены следующие задачи:

- разработаны принципы физического обоснования, построения и анализа петрофизических моделей;
- усовершенствован способ стандартизации диаграмм ГМИС на основе статистических характеристик разрезов;
- экспериментальные исследования и теоретические расчеты позволили доказать справедливость гипотезы о скачкообразном изменении интервального времени (ΔT) в зависимости от степени доломитизации и кальцитизации карбонатных пород, что позволило по данным акустического каротажа выделять известняки и доломиты и с большей точностью оценивать коэффициент пористости;
- детально изучено соотношение между нерастворимым остатком, глинистостью и пористостью карбонатных пород;
- на основе решения системы корреляционных уравнений вида $K_n = f(P_n)$ и $K_n = f(P_n, I_{ne})$ была разработана методика и её модификации, позволившие не только

оценивать характер насыщения (нефть-вода), но и определять наиболее вероятное значение межзерновой (первичной) пористости пластов-коллекторов с вторичной ёмкостью (каверны + трещины).

В этих и других исследованиях с середины 80-х годов принимал участие выпускник кафедры геофизики, ученик В. Курганского, Виталий Владимирович Храпак, успешно защитивший в 1994 г. кандидатскую диссертацию. Адаптация полученных результатов к конкретными геолого-геофизическим условиям и внедрение их в производство связаны с именами таких специалистов, как И.А. Капканщикова, В.М. Лахнюк (УкрНИИПНД), С.С. Златопольский ("Белнефть"), В.Г. Колисниченко ("Укргеофизика"), А.И. Сало ("Архангельскгеология"), В.В. Акимов, Г.И. Мякотина ("Таджикнефть"), Г.И. Овсенко, Л.А. Лозовая (УкрГГРИ).

С конца 80-х – начала 90-х гг. сотрудничество кафедры геофизики и кафедры теоретической и прикладной механики становится ещё более тесным и продуктивным. По инициативе автора оба коллектива становятся активными членами Международной ассоциации "АИС". Без достаточной финансовой поддержки специалисты кафедр – В. Андрущенко, В. Курганский, Г. Зражевский, К. Пазиня, Г. Завалюев, И. Тишаев, В. Бугрий, в содружестве с коллегами заинтересованных организаций (В. Петрук, Р. Челокьян, С. Гошовский, П. Сиротенко, В. Роман, С. Дейнеко и др.) увлечённо работают над разработкой и над проблемами примене-

ния современных геофизических технологий при решении задач нефтяной автоматизированного комплекса геофизических исследований скважин в процессе их бурения (в режиме on line), инженерной геологии и экологии. Основное внимание было уделено разработке триады: пластовой наклонметрии – забойных телеметрических систем – геофизических и геолого-технологических исследований (ГТИ), которые сопровождают процесс бурения. Результаты пластовой наклонметрии уточняют пространственное положение пластов, которые составляют нефтегазоносную структуру и дают возможность более точно, целенаправленно провести геонавигационные работы: войти буровому инструменту в запланированный пласт-коллектор и, при необходимости, пройти в середине, не выходя за его границы. Геофизическая аппаратура, расположенная на "борту" забойной телесистемы, позволяет в процессе бурения получать и передавать на поверхность информацию,

которая вместе с данными ГТИ обеспечивает решение задач, связанных с изучением горных пород.

Созданная в КНУ совместно со специалистами ООО "Букрос-сервис" первая в Украине забойная бескабельная телеметрическая система ПАРКУС с электромагнитным каналом связи, предназначена для контроля и оптимизации траектории и скорости бурения скважин, документирования собранной информации, что дает возможность с её помощью реализовать компьютерную проводку наклонно-направленных и горизонтальных скважин. Разработан и прошел лабораторные и скважинные испытания экспериментальный образец забойного сбрасываемого автономного инклинометра СИ-1. Применение такого прибора является альтернативой эпизодической поточечной инклинометрии и меняет саму идеологию проведения геонавигационных работ при бурении поисково-разведочных и эксплуатационных скважин, существенно удешевляет процесс их проводки.



Идет испытание первой в Украине бескабельной забойной телеметрической системы ПАРКУС

Разработанный экспериментальный образец шестирычажного пластового наклонмера НП-6 успешно прошёл скважинные испытания. Прибор реализует метод бокового микрокаротажа (БМК) и предназначен для определения элементов залегания пластов горных пород.

К указанным выше разработкам в области создания новых технологий, сопровождающих бурение скважин, в области теории каротажа и интерпретации данных ГИС и петрофизики необходимо добавить результаты исследований ученых университета: проф. Г.Т. Продайводы, проф. С.А. Выжвы, проф. А.Н. Карпенко, канд. геол. наук И.Н. Безродной; ученых, сотрудничавших с кафедрой геофизики: д-ра физ.-мат. наук А.Л. Колосова, д-ра техн. наук А.Е. Куликовича; выпускников кафедры геофизики: д-ра техн. наук С.В. Гошовского, д-ра геол. наук М.Д. Красножона, канд. геол. наук М. Бондаренко и др.; учеников В.Н. Курганского: канд. геол.-минералог. наук В.М. Ляхнюка, канд. геол. наук В.В. Храпака, канд. физ.-мат. наук И.В. Тишаева, канд. геол. наук В.А. Маляра, канд. геол. наук В.Г. Бугрия, В. Рябухи и др. В заключение отметим, что за прошедшие 50 лет кафедра геофизики выпустила сотни бакалавров, специалистов, магистров, десятки кандидатов и докторов наук, связавших свою профессиональную деятельность с геофизическими методами исследования скважин.

Современное состояние науки и техники, новые открытия и достижения в области физики, химии, математики, электроники, компьютерной техники, позволяют учёным и практикам ставить и решать такие проблемы, как:

- дальнейшее развитие теории существующих геофизических методов исследований, решение прямых и обратных задач для условий, максимально приближенных к реальной модели исследуемой среды;
- разработка новых методов и модификаций ГИС, в т.ч. таких, которые позволяют получать геолого-

геофизическую и технологическую информацию в процессе бурения скважин;

- разработка на современной электронной базе геофизической аппаратуры нового поколения, которая удовлетворяла бы таким требованиям: термо-, баро-, вибростойкость, многоканальность, модульность, получение геолого-геофизической, геолого-технологической информации в аналоговой и цифровой форме, максимально приближенной к истинным значениям свойств и параметров исследуемого объекта;
- разработка и внедрение в практику производства современных автоматизированных (компьютеризированных) систем обработки и интерпретации промыслово-геофизических и сопутствующих материалов на основе эффективных алгоритмов и программ;
- подготовка специалистов, которые отвечают современным требованиям теории и практики геофизической науки.

Решение вышеуказанных проблем взаимосвязано и предусматривает объединение усилий государственных и частных компаний, фирм, банков и других потенциальных инвесторов, которые должны быть заинтересованы в развитии экономической мощи государства. Инвестиции в образование и науку – наиболее эффективный вклад в развитие любой страны.

Основные работы автора в области *Геофизических исследований скважин*:

1. Курганский В.Н. Корреляционный метод математического обоснования связей между геофизическими параметрами и физическими свойствами пород / В.Н. Курганский // Вопросы промысловой геофизики. Тр. МИНХ и ГП. – Москва, 1967. – Вып. 67. – С. 125–134.
2. Курганский В.Н. К вопросу классификации геологических объектов по корреляционным связям / В.Н. Курганский // Нефть и газ. – 1967. – № 9. – С. 21–24.

3. Курганский В.Н. Изучение корреляционных связей между геофизическими параметрами и физическими свойствами карбонатных отложений на примере газонефтяных месторождений Восточного Предкавказья и Крыма: автореф. дис. ... канд. геол.-минералог. наук / В.Н. Курганский. – М.: МИНХ и ГП, 1968.
4. Курганский В.Н. Совместное использование двумерных и многомерных корреляционных связей между физическими и геофизическими параметрами горных пород для оценки емкостных свойств карбонатных пород Припятской впадины / В.Н. Курганский // Новые геофизические исследования на Украине. Сб. АН УССР. – Киев, 1969. – С. 238–244.
5. Курганский В.Н. Трактровка многомерных уравнений регрессии. / В.Н. Курганский, В.И. Логинов // Разработка нефтяных месторождений и техника эксплуатации скважин. Тр. УкрНИИПНД. – Москва, 1970. – Вып. 5–6. – С. 278–285.
6. Курганский В.Н. Разделение карбонатных коллекторов месторождений Припятской впадины по характеру насыщения и емкостным свойствам (на примере Давыдовского и Вишневского месторождений) // В.Н. Курганский, В.М. Лахнюк, И.А. Капканщикова, Г.И. Овсенко // Геофизический сборник. – 1973. – Вып. 57. – С. 45–50.
7. Курганский В.Н. Опыт стандартизации промыслово-геофизических диаграмм с помощью метода статистических характеристик разреза / В.Н. Курганский, В.М. Лахнюк // Геофизический сборник. – 1974. – Вып. 61. – С. 85–89.
8. Курганский В.Н. Об оценке коэффициента нефтегазонасыщения карбонатных коллекторов межсолевых и подсолевых отложений верхнедевонского возраста / В.Н. Курганский // Методика геофизических исследований на Украине. Сб. статей. – Киев, 1975. – С. 152–157.
9. Kourganaky V. Methodes des Diagraphies / V. Kourganaky, G. Agamaliyev, L. Ansimov // Institut National des Hydrocarbures et de la chimie. Boumerdes. – Alger, 1979. – С. 97.
10. Курганский В.Н. Петрофизические особенности пород олигоцена внутренней зоны Предкарпатья / В.Н. Курганский, В.М. Лахнюк, О.А. Козачок // Вопросы прикладной геохимии и петрофизики. Сб. научн. тр. – Киев, 1981. – С. 110–115.
11. Курганский В.Н. Программа, методические указания и контрольные работы по курсу "Геофизические методы исследований скважин" / В.Н. Курганский. – Киев: КГУ, 1985. – С. 35.
12. Курганский В.Н. Выделение карбонатных пород нижневизейских отложений по данным промысловой геофизики в пределах ДДВ / В.Н. Курганский, В.В. Храпак // Вестник киевского национального университета. Геология. – 1986. – № 5. – С. 23–25.
13. Курганский В.Н. Уточнение литологии и определения емкостных свойств карбонатных пород по данным ГИС (на примере Тимано-Печерской провинции) / В.Н. Курганский, В.П. Грибас, В.В. Храпак, А.И. Сало // Геология и нефтегазоносность Севера Европейской части СССР. Тр. Зап. Сиб. НИИГРИ. – Тюмень, 1990. – С. 19–24.
14. Курганский В.Н. Использование статистических характеристик карбонатного разреза для выделения коллекторов на примере нижедевонских отложений Северо-Сарембойского месторождения / В.Н. Курганский, В.В. Храпак // Тр. ПГО "Архангельскгеология", 1992. – С. 17–23.
15. Курганский В.М. Петрофизическая модель карбонатного коллектора нефти и газа Афганско-Таджикской западины / В.М. Курганский, В.В. Храпак // Вестник Киевского национального университета. Геология. – 1994. – Вып. 12. – С. 61–64.
16. Курганский В.Н. О характере зависимости интервального времени ΔT от степени доломитизации и кальцитизации карбонатных пород / В.Н. Курганский, В.В. Храпак // Геофизический журнал. – 1995. – Т. 17. – С. 74–77.
17. Курганский В.М. Про співвідношення теоретичного та експериментального підходу у дослідженнях / В.М. Курганський. Вісник Київського національного університету. Геологія. – 1996. – Вип. 14. – С. 3–10.
18. Курганский В.Н. Петрофизические и геофизические методы изучения сложнопостроенных карбонатных коллекторов нефти и газа / В.Н. Курганский. – Киев, 1999. – 166 с.
19. Курганский В.Н. Способ выделения поровых карбонатных коллекторов по данным ГМ и НГМ / В.Н. Курганский // Научн.-техн. вестник. – 2001. – Вып. 80. – С. 127–130.
20. Курганский В.М. Промысловая геофизика: стан, проблеми, перспективи розвитку / В.М. Курганський // Наукові записки. Географ. фак-т, геолог. фак-т. Київ. – 2004. – Т. III. – С. 139–142.
21. Курганський В.М. Петрофізична модель $K_p=f(P_n, A_{да})$ та її використання для оцінки пористості гірських порід / В.М. Курганський // Перспективи нафтогазоносності глибокозанурених горизонтів осадових басейнів України. – Івано-Франківськ, 2005. – С. 186–192.
22. Курганский В.Н. Промысловая геофизика как составная часть геоинформационной системы / В.Н. Курганский // Научн.-техн. вестн. Каротажник. – 2005. – Вып. 3–4 (130–131). – С. 135–139.
23. Андрущенко В.О. Вибірний скидний автономний інклінометр / В.О. Андрущенко, В.М. Курганський, М.В. Петрук, І.В. Тишаєв // Проблеми нафтогазової промисловості. 36. наук. праць. – 2008. – Вип. 6. – С. 58–68.
24. Андрущенко В.А. Сбросовой инклинометр – средство постоянного оперативного контроля траектории ствола скважины в процессе бурения / В.А. Андрущенко, В.Н. Курганский, И.В. Тишаев, Н.В. Петрук, В.Н. Петрук, М.И. Ширманов, А.И. Удовиченко // Научн.-техн. вестн. Каротажник. – 2008. – Вып. 3 (168). – С. 35–41.
25. Андрущенко В. Експериментальний сейсмокомплекс "КНУ – УКРДГРІ" та його можливості при вирішенні геологічних задач / В. Андрущенко, В. Курганський, В. Роман, П. Сиротенко, І. Тишаєв, В. Бугрій // Вісник Київського національного університету. Геологія. – 2009. – С. 47–51.
26. Курганський В.М. Електричні та електромагнітні методи дослідження свердловин / В.М. Курганський, І.В. Тишаєв. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2011. – 170 с.
27. Курганский В.Н. Сейсмоакустические методы решения геолого-геофизических и технологических задач в процессе бурения нефтегазовых скважин / В.Н. Курганский, В.А. Андрущенко, В.Г. Бугрий, П.Т. Сиротенко // Каротажник. – 2013. – Вып. 1 (223). – С. 24–38.
28. Курганский В.Н. Практические результаты лабораторных и скважинных испытаний автономного инклинометра на основе микромеханических гироскопов волнового типа / В.Н. Курганский, В.А. Андрущенко, Г.М. Зражеский, И.В. Тишаев, В.Г. Бугрий, В.Н. Петрук // Геоинформатика. – 2014. – Вып. 1 (49). – С. 25–37.
29. Курганський В.М. Визначення коефіцієнта нафтонасичення низькоомних пластів-колекторів за нейтронними характеристиками середовища на прикладі Дніпровсько-Донецької западини / В.М. Курганський, К.О. Ручко // Мінеральні ресурси України. – 2016. – Вип. 4. – С. 47–49.

V. Kurgansky, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
E-mail: kyrgan40@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkinska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

"GEOPHYSICAL RESEARCHES OF MINING HOLES" – 50 YEARS AT TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

Development of carotage (retrospective years 1969-2019) at Taras Shevchenko National University of Kyiv is described. Basic achievements are shown in educational and scientific directions. Carbonate rocks methodology study problems, petrophysical models which allowed building physically well-founded dependences of "core-core", "core-geophysics", "geophysics- geophysics" type are described. Petrophysical simulation, theory of probability and mathematical statistics methods allowed the author to work out a complex system of data processing and interpretation in well-logging. Current status and tendency in dataware drilling process of the deep oil and gas wells are examined. Absolutely new ideology of operative getting of the reliable directional survey data without special logging services (telesystem in the process of drilling, autonomous inclinometer and other) is proposed.

Keywords: geophysical well-logging (carotage), petrophysic models, carbonate rocks, rocks-reservoirs, interpretation, porosity, saturation, geonavigation, telesystem in the process of drilling, autonomous inclinometer, micromechanical sensors.

В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vladvam@gmail.com
О. Іванік, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com
В. Янченко, канд. геол. наук, зав. лаб.,
E-mail: yanchen@ukr.net

Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: dm.vl.kravchenko@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

СЛОВО ПРО ЮВІЛЯРА НА ЧЕСТЬ 80-річчя ПРОФЕСОРА ОЛЕКСАНДРА ІВАНОВИЧА ЛУКІЄНКА

Окреслено життєвий шлях та науково-педагогічну діяльність видатного українського геолога, доктора геолого-мінералогічних наук, професора Олександра Івановича Лукієнка. Охарактеризовано головні етапи його трудової діяльності, проаналізовано наукові здобутки, результати педагогічної роботи, відзначено внесок у розвиток української та світової геологічної науки.

Ключові слова: Лукієнко Олександр Іванович, геолог, життєвий шлях, науково-педагогічна діяльність.

У 2019 році виповнюється 80 років видатному геологу, доктору геолого-мінералогічних наук, професору Олександру Івановичу Лукієнку (рис. 1).



Рис. 1. Професор О.І. Лукієнко

О.І. Лукієнко народився 28 лютого 1939 р. у селищі Артем Шахтинського району Ростовської області у родині залізничника. У тому ж році його батьки переїхали на Івано-Франківщину, де і пройшли його дитинство і юність.

Свою трудову діяльність О.І. Лукієнко почав оператором із видобутку нафти на Долинському нафтопромислі в Івано-Франківській області. У 1958–1963 рр. він навчався на геологічному факультеті Львівського державного університету ім. Івана Франка. Після закінчення університету з власної ініціативи поїхав на Крайній Північний Схід (Магадан). Там, уже на місці був направлений на Колиму (Нексиканське РайГРУ). У цьому краї й відбулося його перше становлення як геолога. Працював на державній геологічній зйомці у верхів'ї р. Аяну, в одному із найбільш віддалених районів, де рідко ступала нога людини. Там він займався пошуками розсіпних родовищ золота. У своїх спогадах Олександр Іванович відзначає, що цей край вразив його надзвичайною суворістю і дуже складними умовами для життя. Найгіршим було – зграї комарів та гнусу. Але молодість перемогла й дозволяла долати усі побутові труднощі.

Відзначений початок геологічної діяльності був перерваний дворічною службою у Радянській Армії (1963–1965 рр. у Хабаровському краї та Амурській області). Служив майже за спеціальністю – у топографічному загоні. Після демобілізації, бажаючи розширити свій геологічний світогляд, він поїхав у Казахстан, який тоді вважався унікальним регіоном у геологічному відношенні. Планував затриматись у Казахстані на декілька років, а залишився майже на тридцять. У цьому краї він одружився, й там народилися його діти: син та донька.

Перші одинадцять років у Казахстані працював на виробництві в об'єднанні "Волковгеологія" геологом,

начальником загону, а пізніше старшим геологом партії. Займався знімальними, пошуковими та розвідувальними роботами у Південному Казахстані (пустеля Бетпакдала, Чу-Ілійські гори, Кендиктас та Заїлійський Алатау) (рис. 2). Об'єктами досліджень були ураноносні структури. Саме тоді й проявився підвищений інтерес до структурно-петрологічних досліджень. Результати цих досліджень згодом стали основою кандидатської дисертації "Тектономагматизм гор Кендыктас".

У 1975 р. О.І. Лукієнко вступив на заочне відділення аспірантури Інституту геологічних наук АН КазССР імені К.І. Сатпаєва до відомого у той час ученого-тектоніста Є.І. Паталахи, а в 1976 р. перейшов працювати у цей науковий заклад (спочатку на посаду старшого інженера, а згодом – старшого наукового співробітника). Його перехід збігся із формуванням там потужної наукової школи в галузі генетичних напрямів морфологічної тектоніки та розробки методології *тектонофаціального аналізу* (одного з напрямів структурного аналізу). О.І. Лукієнко брав активну участь у дослідженнях за відзначеними напрямками і став одним із провідних розробників мезо- та мікродислокаційних аспектів цього аналізу. Крім того, за його участі було ідентифіковано й типізовано такі раніше не достатньо вивчені дислокаційні утворення, як в'язкі розломи, вторинні монокліналі, в'язкі протрузії, кліваж та інші. Результати відзначених казахстанських досліджень знайшли висвітлення в докторській дисертації "Тектонофації складчатих сооружений (на примере палеозоид Казахстана)" (1994 р.) та у серії публікацій, зокрема в монографіях: "Проблемы тектоники Казахстана" (1981), "Тектонофации мезозоны (Атлас микроструктур)" (1987), "Тектонофаціальний анализ и его роль в геологии, металлогении и геофизике" (1989).

У 1994 р. О.І. Лукієнко разом із сім'єю повернувся в Україну. Перші два роки працював провідним науковим співробітником у Відділенні морської геології НАН України, де займався дослідженням тектонофаціальної структури Криму та Кривбасу. У цей же період, у співавторстві з Є.І. Паталахою та В.В. Гончаром, було підготовлено й опубліковано монографію "Тектонические потоки как основа понимания геологических структур" (1996), яка певною мірою підвела підсумок багаторічним тектонофаціальним дослідженням у Казахстані й Україні. У цій роботі було представлено науково оформлену концепцію тектонічного потоку як ініціатора й організатора структурної перебудови літосфери. Було показано, що такий потік змінює свою структуру по вертикалі й у верхніх горизонтах літосфери реалізується як зсувна течія порід по розломах.

З 1996 по 2015 р. О.І. Лукієнко працював у ННІ "Інститут геології" (до 2014 р. – геологічний факультет)

Київського національного університету імені Тараса Шевченка, займаючи посаду завідувача кафедри загальної та історичної геології (1997–2003 рр.), професора цієї кафедри (1996 р. та 2003–2007 рр.), а в останні роки – професора-консультанта (рис. 3–5).

За час роботи в університеті професор О.І. Лукієнко підготував навчальний посібник "Морфологічна тектоніка (на тектонофаціальній основі)" (2001) та підручники

"Структурна геологія з основами структурно-парагенетичного аналізу" (2002) і "Структурна геологія" (2008) (рис. 6). За підручник "Структурна геологія з основами структурно-парагенетичного аналізу" нагороджений премією імені Тараса Шевченка Київського національного університету імені Тараса Шевченка.



Рис. 2. О.І. Лукієнко на маршруті у Чу-Ілійських горах у Південному Казахстані (1972 р.)



Рис. 3. Геологи в полі. О.І. Лукієнко та Г.М. Яценко (околиці м. Гайворон 2004 р.)



Рис. 4. О.В. Грінченко, В.В. Огар, О.І. Лукієнко (зліва-направо) на польових роботах в Українських Карпатах (2004 р.)



Рис. 5. Професор О.І. Лукієнко на польових роботах в районі р. Тетерів (2008 р.)

Професор О.І. Лукієнко проводив активну науково-організаційну роботу. Тривалий час він був членом спеціалізованої вченої ради із захисту кандидатських та докторських дисертацій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, експертної комісії ВАК України, членом редколегії журналу "Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія Геологія".

Під час роботи в університеті паралельно з навчальним процесом О.І. Лукієнко продовжував займатися науковими дослідженнями в галузі морфологічної тектоніки та розробки тектонофаціальної методології структурного картування стосовно до гранітно-метаморфічних

комплексів Українського щита, що дало подальший поштовх для розвитку наукової школи структурного аналізу на кафедрі загальної та історичної геології. Разом зі своїми учнями він виконує тектонофаціальні дослідження дислокаційних структур докембрію Українського щита, результатом яких стали тектонофаціальні схеми та розрізи у масштабах, що узгоджуються з геологознімальними та геологорозвідувальними роботами. Ці матеріали, що несуть інформацію про морфореологічні типи прояву дислокаційної тектоніки на досліджених територіях та характер розподілу в межах цих структур тектонофацій, слугують структурною основою для

геологічних та прогнозних карт. Методи тектонофаціального аналізу було використано в ході структурного супроводження ГДП-200 Первомайського аркушу (замовник – Український державний геологорозвідувальний інститут, 1999–2003 рр.). Було виконано низку наукових робіт на замовлення Державної геологічної служби України, зокрема "Петромагнітні дослідження кристалічного фундаменту УЩ для визначення металогенічної інформативності (на прикладі Середнього Побужжя та приазовської частини УЩ)", "Тектонофаціальні та петромагнітні дослідження синметаморфічної тектоніки УЩ з метою розробки структурно-геофізичної моделі картування" та ін. Результати цих досліджень викладені в опублікованих монографіях "Дислокаційна тектоніка та тектонофації докембрію Українського щита" (2008) та "Структурно-парагенетичний аналіз (епізона)" (2015) (рис. 6).

Після виходу на пенсію О.І. Лукієнко інтенсивно займається науковою роботою. У результаті чого побачила світ ще одна велика праця "Структурно-парагенетичний аналіз (мезозона та катазона)" (2018). Ця монографія є узагальненням безцінних багаторічних польових досліджень Казахстану та України. У роботі розглянуто роль тектонічної течії як провідного чинника дислокаційних та динамометаморфічних перетворень геологічних середовищ. Окрім того, відзначено важливу роль синдеформаційних мінеральних та структурних перетворень гірських порід у забезпеченні такої течії. При цьому важлива увага приділена самоорганізації відзначених процесів.

Загалом наукові та навчальні напрацювання О.І. Лукієнка знайшли висвітлення у 164 друкованих наукових та навчально-методичних працях, у т. ч. у дев'яти монографіях, навчальному посібнику та двох підручниках.

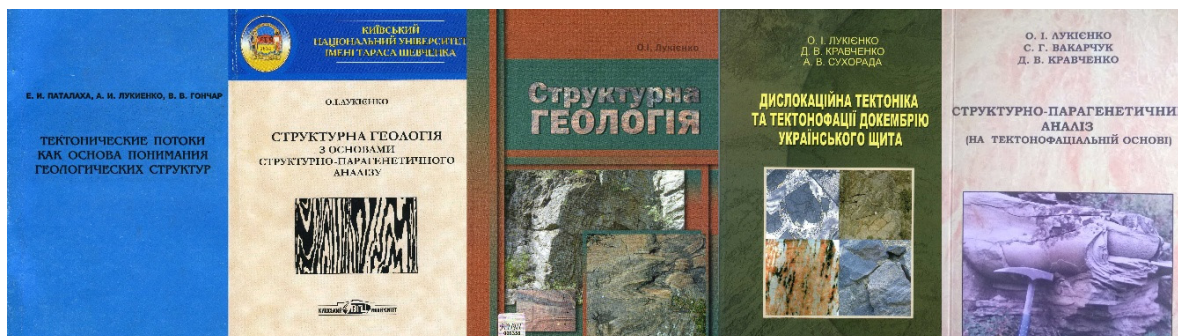


Рис. 6. Підручники та монографії за авторством професора О.І. Лукієнка

О.І. Лукієнко активно займався підготовкою наукових та педагогічних кадрів. Він підготував п'ять кандидатів наук і продовжує продуктивно співпрацювати з науковою геологічною спільнотою. Олександра Івановича обрано академіком Академії наук Вищої школи України.

Наукову та педагогічну діяльність професора О.І. Лукієнка в Україні відзначено срібною медаллю "За заслуги" Спілки геологів України та медаллю ім. В.І. Луцицького

"За заслуги у розвідці надр" Державної геологічної служби України.

Колектив ННІ "Інститут геології" щиро вітає справжнього патріота України та геологічної справи з 80-річчям! Колеги та учні бажають міцного здоров'я, щастя, благополуччя, успішних успіхів, тепла і затишку в родинному колі, творчої наснаги та многа літа!

V. Mykhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vladvam@gmail.com
O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com
V. Yanchenko, PhD (Geol.), Head of Laboratory,
E-mail: yanchen@ukr.net
D. Kravchenko, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: dm.vl.kravchenko@gmail.com
National Taras Shevchenko University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

THE 80TH BIRTHDAY ANNIVERSARY OF PROFESSOR OLEKSANDR LUKIENKO

The consideration is given to scientific and pedagogical activity of the prominent Ukrainian geologist, Doctor of geological and mineralogical sciences, professor Oleksandr Ivanovich Lukienko. His work activity as a scientist, teacher and administrator has been described. His contribution to development of Ukrainian and world geology was outlined.

Keywords: Oleksandr Lukienko, geologist, life path, scientific and pedagogical activity.

В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vladvam@gmail.com
Е. Иваник, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com
В. Янченко, канд. геол. наук, зав. лаб.,
E-mail: yanchen@ukr.net
Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: dm.vl.kravchenko@gmail.com
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

СЛОВО ПРО ЮБИЛЯРА В ЧЕСТЬ 80-ліття ПРОФЕСОРА АЛЕКСАНДРА ІВАНОВИЧА ЛУКІЄНКО

Описаны жизненный путь и научно-педагогическая деятельность выдающегося украинского геолога, доктора геолого-минералогических наук, профессора Александра Ивановича Лукиенко. Охарактеризованы главные этапы трудовой деятельности, результаты педагогической работы, отмечен вклад в развитие отечественной и мировой геологии.

Ключевые слова: Лукиенко Александр Иванович, геолог, жизненный путь, научно-педагогическая деятельность.

Наукове видання



ВІСНИК
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ГЕОЛОГІЯ
Випуск 1(84)

Комп'ютерна обробка статей – 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.

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.



Формат 60x84^{1/8}. Ум. друк. арк. 11,28. Наклад 300. Зам. № 219-9348.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл1.
Підписано до друку 27.03.19

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